A. S. EDDINGTON

# LUCI DALL'INFINITO

SECONDA EDIZIONE ITALIANA

A CURA DI R. CONTU

# LUCI DALL' INFINITO

A. S. EDDINGTON
PROFESSORE ALL'UNIVERSITÀ DI CAMBRIDGE

# LUCI DALL' INFINITO

SECONDA EDIZIONE ITALIANA ACCRESCIUTA
A CURA DI RAFAELE CONTU
CON INTRODUZIONE DI GIORGIO ABETTI

VENTOTTO ILLUSTRAZIONI FUORI TESTO

ULRICO HOEPLI EDITORE MILANO
1934-XII

PROPRIETÀ LETTERARIA

Milano, 1934 - XII — Scuola Tipografica Figli della Provvidenza.

# INDICE-SOMMARIO

PREFAZIONE dell'Autore all'edizione italiana . . IX
INVITO ALL'ASTRONOMIA di Giorgio Abetti . . . XIII
AVVERTENZE del Traduttore . . . . . XXVII

## I
## L'INTERNO D'UNA STELLA

*Premessa* . . . . . 1
*La temperatura interna d'una stella* . . . . . 4
*La ionizzazione degli atomi* . . . . . 12
*Pressione di radiazione e massa* . . . . . 23
*Immagine dell'interno d'una stella* . . . . . 26
*L'opacità della materia stellare* . . . . . 29
*Relazione fra lo splendore e la massa* . . . . . 33
*Stelle dense* . . . . . 39
*Conclusione* . . . . . 44

## II
## ATOMI LONTANI E NUOVE STORIE DI ASTRI

*La novella di Algol* . . . . . 47
*La novella della compagna di Sirio* . . . . . 56
*Atomi nuovi ed interpretazione degli spettri* . . . 64
*Serie spettrali* . . . . . 72
*La nebulosità dello spazio* . . . . . 78
*La cromosfera solare* . . . . . 87
*La novella di Betelgeuse* . . . . . 95

## III
## L'ETÀ DELLE STELLE

*Premessa* . . . . . 107
*Stelle pulsanti* . . . . . 108
*La Cefeide: "candela-campione"* . . . . . 114
*L'ipotesi della contrazione* . . . . . 119
*Energia subatomica* . . . . . 127
*L'evoluzione delle stelle* . . . . . 137
*Radiazione di massa* . . . . . 146

## IV
## MATERIA COSMICA NELLO SPAZIO

*Introduzione* . . . . . 159
*Testimonianze dell'osservazione* . . . . . 162
*Densità della nube cosmica* . . . . . 170
*L'elevata temperatura della nube* . . . . . 174
*Prove della teoria* . . . . . 180
*Accrescimento esterno delle stelle* . . . . . 183

## V
## L'ESPANSIONE DELL'UNIVERSO

*Premessa* . . . . . 189
*Avvicinamento ed allontanamento delle nebulose spirali* 190
*Il meccanismo dell'espansione dell'Universo* . . . . 195

APPENDICE A: *La Compagna di Sirio e la nuova fisica* . . . . . 203
APPENDICE B: *L'identificazione del nebulio* . . . . 213

INDICE ALFABETICO . . . . . 219

## *PREFAZIONE*
## *ALLA PRIMA EDIZIONE ITALIANA*

*Le prime tre conferenze contenute in questo libro, scritte nel 1926 e pubblicate sotto il titolo "Stelle ed Atomi", concernono questioni di astrofisica verso cui particolarmente s'indirizza la mia attenzione.*

*A giustificare il titolo sotto cui sono state raccolte pel lettore inglese, dirò che i progressi raggiunti nel campo della conoscenza degli atomi e della radiazione hanno consentito molteplici ed interessanti applicazioni alle stelle ed alle nebulose; mentre lo studio della materia, in cosí estreme condizioni quali sono quelle che dominano nelle stelle e nelle nebulose, è stato di considerevole ausilio agli sviluppi della fisica atomica. Però, discorrendo questi argomenti, il nostro pensiero oscilla di continuo fra l'enormemente grande e l'enor-*

*memente piccolo: dalla stella all'atomo e quindi, di bel nuovo, alla stella.*

*Non credo che queste conferenze abbiano perduto oggi il pregio dell'attualità, e possano considerarsi sorpassate. Invero gli ultimi sei anni hanno visto la scienza progredire in varie direzioni; ma son progressi, per lo piú, di natura tecnica, non adatti ad essere esposti in un libro dell'indole di questo. Certo, i ragionamenti e le conclusioni che qui trovano posto sono i medesimi che oggi tuttavia seguo e mantengo; e solo va notato che, di recente, ha potuto dimostrarsi meglio come, fra i costituenti della materia delle stelle, l'idrogeno sia presente in proporzione maggiore di quella prima supposta; cioè un 40 o 50 per cento, forse, della massa delle singole stelle, a petto della piú esigua proporzione che era stata ammessa a pagina 19 del testo. Ma sarebbe prematuro il credere che il nuovo dato — non v'è dubbio sulla importanza della variazione che comporta — possa considerarsi stabilito affatto; e non è consigliabile affrettarsi a mutare comunque le conclusioni cui partecipa il dato medesimo. Altri importanti risultati, suc-*

*cessivi alla pubblicazione delle conferenze, vengono esposti nelle due Appendici A e B.*

*Quest'edizione italiana comprende, in piú di quelle dell'edizione originale, una conferenza che tratta ampiamente della "materia cosmica nello spazio", questione accennata già nella seconda conferenza.*

*Io spero fermamente sia a tutti palese l'assenza di ogni spirito dommatico nelle pagine che seguono, dove si trattano problemi intorno ai quali molto ancora dobbiamo imparare, e dove poteva essere schiettamente detto solo quali siano le nostre idee attuali sui medesimi problemi, e come abbiamo cercato ed andiamo cèrcando di accrescere le nostre cognizioni in questi campi.*

*È una fortuna, per me, il potermi rivolgere a lettori italiani. Se queste conferenze fossero state un po' piú tecniche, vi si sarebbe potuto leggere che la classificazione delle stelle secondo differenti tipi spettrali (ciò che, come possiamo oggi dire, vale quanto invocare differenti temperature) trae origine da Padre Secchi, e segnò il punto di partenza per gran parte delle successive elaborazioni del-*

*l'argomento. Ma, essendomi imposto di mantenermi lontano dai punti difficili che la questione presenta, ho dovuto omettere il nome degli uomini in virtú dei quali nacquero cosí difficili cose.*

*M'auguro, pel tramite di queste conferenze, di poter far dividere al lettore il piacere che io ho provato vagando col pensiero fra le stelle.*

*A. S. EDDINGTON*

*Osservatorio di Cambridge, agosto 1932.*

# *INVITO ALL'ASTRONOMIA*

*Questo libro, che in inglese ha quasi lo stesso titolo* (Stars and Atoms) *di quello dello Stoermer, tradotto con tanta fortuna da Rafaele Contu e pubblicato cosí degnamente dall'editore Hoepli, è stato già dal Contu stesso annunziato e non ha certo bisogno, né pel nome dell'autore, né per quello del traduttore, di una introduzione al lettore. Tuttavia, è sempre bene ribattere i concetti che valgono ad istillare l'interesse e l'amore per gli argomenti d'ordinario trattati in simili libri, e cosí potranno essere scusate queste brevi parole. È certo che quanti prendono in mano il presente volume, con la buona intenzione di leggerlo, non hanno proprio bisogno di incitamento: essi possono senz'altro omettere le medesime parole. Per coloro, invece, che non sono completamente convinti dell'utilità di queste divulgazioni della scienza, la lettura di esse non sarà del tutto inopportuna.*

*Ho sempre trovato che il discutere, come avviene qualche volta, sull'utilità dell'Astronomia è di cattivo gusto, perché ciò equivale quasi a dubitarne, mentre io penso che nessuno possa credere non sia utile, anzi direi necessario all'umanità, lo studio della scienza dei cieli.*

*In generale, quando si parla di Astronomia si vede aprire la bocca o scuotere la testa, come per dire che si tratta di materia astrusa, fuori del comune ambito delle cose mortali e dominio di pochi privilegiati, se non addirittura di esaltati, che vivono fuori della vita ordinaria. Se è vero che l'Astronomia teorica si deve annoverare fra le scienze piú difficili, e per le quali profonde cognizioni di matematica e fisica sono necessarie, è altrettanto vero che l'Astronomia di osservazione e quella descrittiva sono alla portata di tutti, e da tutti potrebbero e dovrebbero essere coltivate, a cominciare dai giovani nelle scuole e poi nel corso della vita. Invece, ai nostri studenti non si parla quasi mai di Astronomia, e solo di sfuggita vien loro data qualche nozione di Cosmografia generale nelle classi inferiori, dal professore di lettere, giacché la Geografia rientra nel programma delle materie letterarie. Con questa Cosmografia a scartamento ridotto — alla quale si riduce tutta la scienza astronomica compresa nella cultura generale di quanti rinunzieranno a farne poi uno studio speciale — è chiaro che non si riesca a sviluppare da noi il desiderio di apprendere od approfondire argomenti di cui non si è mai udito parlare, dimenticando troppo spesso come gli uomini siano stati creati per volgere lo sguardo al cielo.*

*Ricordo di essere andato a visitare qualche anno fa, a San Francisco di California, una scuola, corrispondente molto prossimamente ai nostri Istituti Tecnici, intitolata al nome di Galileo Galilei. Nel piano piú alto del magnifico e luminoso edificio,*

*fui condotto a visitare l'aula di Astronomia, dove si svolgeva una lezione di questa disciplina. Quindi, per una scala a chiocciola, sul tetto dell'edificio, in una cupola che conteneva un piccolo equatoriale, quasi tutto costruito dagli allievi stessi nell'officina della scuola. Due allievi stavano osservando il* Sole *e determinando la posizione di alcune macchie allora visibili sul disco. Questo non è se non un esempio; ma molti altri potrei citarne, per mostrare lo sviluppo e la parte che si dà all'insegnamento della Astronomia da altre nazioni, tanto nelle scuole medie quanto in quelle superiori. Conseguenza di questo insegnamento è, che l'interesse generale per l'Astronomia viene piú sviluppato nella vita della nazione, e cosí si hanno società non solo di professionisti, ma anche di dilettanti i quali coltivano con amore e competenza le discipline astronomiche, e trovano in esse riposo e sollievo dalle diuturne fatiche.*

*Cosí, per esempio, a Praga, su una delle colline che circonda quella capitale, vi è un Osservatorio di dilettanti — dedicato alla memoria del Generale* Stefanik, *valoroso soldato, astronomo e geografo — ricco d'un corredo di strumenti che parecchi Osservatori ufficiali debbono invidiare. Agli strumenti di vario tipo e dimensioni s'aggiungono una bella biblioteca e stanze per le riunioni e comodità dei soci. Fra questi gli astronomi di professione sono pochissimi e sono invece numerosi i dilettanti che, occupandosi nella vita di cose molto lontane dall'Astronomia, pure fanno del lavoro interessante, geniale ed anche utile per la scienza.*

*Si sarebbe quasi condotti a pensare che in Europa*

*l'amore per l'Astronomia stia in ragione inversa della serenità e della bellezza del cielo. Infatti, mentre nei paesi settentrionali si coltiva con passione, e da un numero relativamente grande di persone, lo studio del cielo, via via che si procede verso il sud sembra diminuisca il desiderio di osservarlo: forse perché è piú facile contemplarlo esteticamente e passivamente, di quanto non sia il farne oggetto di una speciale applicazione.*

*L'Italia, sebbene vanti dalle Alpi alla Sicilia un cielo davvero piú sereno delle regioni settentrionali d'Europa, e vanti altresí una Società Astronomica, discendente da quella degli Spettroscopisti Italiani, fondata dal P. Secchi e dal Tacchini — la prima nel mondo che abbia fatto ragione della sua esistenza lo studio del cielo con lo spettroscopio —, non sfugge tuttavia al fenomeno accennato, mentre dovrebbe essere, per le sue stesse tradizioni, fra i paesi piú progrediti, sia nella parte puramente scientifica, sia in quella divulgativa. Ma se ciò oggi non è, auguriamo possa darsi in un futuro non troppo lontano: certamente dà bene a sperare il vasto e generale interesse che vanno prendendo le pubblicazioni simili a questa.*

*Posto come principio che lo studio della scienza astronomica è necessario allo spirito, è naturale il desiderio di spingere piú oltre, fin dove sa giungere la mente umana, la nostra conoscenza sull'Universo che ci circonda. È bene quindi fermarci a considerare l'influenza che i progressi dell'Astronomia hanno avuto ed avranno sull'educazione spirituale dei popoli.*

*Mentre si calcola che la vita umana sulla* Terra *sia cominciata da circa tre centinaia di migliaia di anni, notizie certe che l'uomo si sia occupato di Astronomia datano soltanto da tremila anni, l'invenzione del telescopio risale a poco piú di trecento anni, e l'inizio dell'Astrofisica, cioè di quel ramo dell'Astronomia che studia la costituzione fisica degli astri, risale a soli settanta anni.*

*Come è ben noto, la scienza del cielo fu inizialmente trattata soltanto dal punto di vista, diremo cosí, divino, essendo, per esempio, il* Sole *considerato una divinità alla quale s'inalzavano grandiosi templi, mentre negli astri si cercava di leggere la loro influenza sulle persone e sui fatti terreni. Tuttavia anche in questo modo venivano acquistate le prime rudimentali nozioni sulla posizione ed il moto degli astri. L'invenzione del cannocchiale rivoluziona completamente, e fa progredire d'un balzo, le conoscenze astronomiche, sicché l'Astronomia acquista sempre piú il carattere di scienza esatta. Dal dominio di pochi, essa si propaga via via in piú vaste sfere, e si rivolge alla mente di grandi intelligenze, da cui derivano sempre nuove e meravigliose scoperte; le schiere dei ricercatori aumentano sempre piú, e pur cresce il numero di coloro in cui va formandosi la convinzione e la coscienza che lo studio dell'Astronomia è uno dei piú elevati e piú nobili che possa occupare la mente umana.*

*Dal tempio antico, eretto per l'adorazione degli astri, siamo passati a quello attuale, con strumenti poderosi, frutto dei piú moderni perfezionamenti dell'ottica e della meccanica, collocati in cima ad*

*alte montagne «per non essere disturbati dal tremito delle vetture, né dal suono delle campane», come diceva il P. Secchi, e molto piú, potremo dire noi, per non essere disturbati dall'enorme quantità di luce che le grandi città proiettano durante la notte verso il cielo, e dalla polvere e dal fumo i quali costantemente le sovrastano. Gli astronomi, segregati dal mondo come i sacerdoti dell'antichità, tengono viva la fiamma del sapere e compiono con pazienza le loro ricerche, destinate, dopo essere state discusse e spiegate, a diffondersi per il mondo.*

*Un altro notevolissimo progresso nella conoscenza dell'Universo avvenne il giorno non lontano, che risale come si è detto soltanto a circa settanta anni fa, in cui si pensò di applicare lo spettroscopio e l'analisi spettrale allo studio del cielo. Da quel giorno ebbe origine l'Astrofisica, con progressi tanto celeri da lasciare sbalorditi e quasi increduli sui risultati ottenuti, mentre il suo dominio si compenetra a tal segno in quello dell'Astronomia propriamente detta, da farne una cosa sola. Oramai l'una e l'altra si comprendono e si completano a vicenda, si usino i metodi classici concernenti la posizione ed il moto degli astri, o si usino i metodi moderni che provengono dai varî rami della Fisica.*

*Gli estremi si toccano, si suole dire comunemente, e lo stesso può ritenersi studiando l'infinitamente grande e l'infinitamente piccolo, tanto che adesso è di moda parlare di "stelle ed atomi", e considerare alla stessa stregua i numeri grandi e piccoli con cui misuriamo le loro dimensioni.*

*L'Eddington, colla sua forma vivace con cui*

*si sforza e riesce veramente ad uscire dal difficile e spesso pesante linguaggio scientifico, cerca di dare un quadro, appunto dagli atomi alle stelle, di quelle nuove conquiste del genio umano che ci conducono ad immaginare, senza eccessiva difficoltà, stati della materia quali prima non eravamo abituati a concepire. In una scala enormemente vasta, possiamo dire senza limiti, non c'è infatti da meravigliarsi se troviamo temperature molto e molto piú alte di quelle comunque ottenibili sul nostro pianeta, e densità della materia estremamente grandi o piccole, rispetto a quella campione dell'acqua, di cui, pel fatto d'essere campione, diciamo comunemente che ha la densità uguale ad uno.*

*Nonostante il suo linguaggio immaginoso, l'Eddington non si lascia davvero prendere la mano dalla immaginazione o dalla fantasia. Le scoperte delle quali egli va narrando sono basate su deduzioni di fatti accertati, che potranno essere forse interpretati in modo differente, ma non cesseranno per questo di esistere e che, per il momento, in base alle migliori teorie conosciute, non si possono meglio spiegare. Specialmente in queste interpretazioni o sviluppi teorici dei fatti osservati, come anche nella previsione da parte della teoria di ciò che si deve trovare nel cielo, eccelle l'Eddington esponendo di frequente, in queste conferenze, il risultato degli ormai ben noti suoi lavori personali.*

*Quando egli ci parla dell'interno di una stella, bisogna ricordare che con lo spettroscopio noi riusciamo a vedere solamente un sottile strato superficiale di essa, con uno spessore di poche migliaia*

*di chilometri; e che, essendo la stella d'altra parte dotata di un volume relativamente grande, per arrivare ai suoi strati interni vi sono ancora da percorrere parecchi milioni di chilometri. Come è fatta questa stella nel suo interno, in quali condizioni vi si trova la materia? Sappiamo che nella nostra* Terra *solida, in luogo del già creduto fuoco centrale, si ha probabilmente un nucleo di ferro e nichel; ma, nelle stelle, tutte le materie — le stesse che costituiscono la* Terra *— in conseguenza dell'alta temperatura si trovano, alla superficie, allo stato di vapore. Procedendo verso l'interno della stella, la teoria ci insegna che la temperatura, assieme alla pressione, debbono crescere continuamente, fino a diventare molto, ma molto grandi. E allora bisogna immaginare che cosa avverrà di questa materia, i cui atomi già vibrano liberamente alla superficie, quando la temperatura e la densità crescono in modo cosí spettacoloso nel loro interno: e proprio questo l'Eddington, in base alle moderne teorie fisiche, ci fa intravedere.*

*Nella seconda conferenza, dove si tratta di varie e recenti ricerche e scoperte, una piú di tutte, forse, ci fa restare attoniti, ed è quella relativa alla compagna di* Sirio. *Già nella sua teoria, che data dal 1924 ed è spiegata nella prima conferenza, Eddington arrivava alla conclusione che la materia nell'interno delle stelle deve trovarsi ad una densità tanto grande quale noi, guidati dalle esperienze terrestri, possiamo a mala pena concepire, e prevedeva che la compagna di* Sirio *doveva trovarsi in condizioni eccezionali di densità. Posto ciò, secondo la*

*teoria di Einstein, le righe spettrali di queste stelle dovevano trovarsi spostate verso il rosso di un determinato e ben misurabile ammontare. Ma per questa misura ci voleva un cannocchiale molto potente: fu pregato il celebre direttore dell'Osservatorio di Monte Wilson, W. S. Adams, di tentare di eseguirla. Il risultato corrispose esattamente alle previsioni teoriche di Einstein e di Eddington, ed è logico quindi ammettere che tale concordanza non sia l'effetto di un caso e inoltre che le teorie e le ipotesi siano ammissibili, anzi le migliori fra quelle sinora invocabili. Altrettanto ricche d'interesse, ed importanti per i risultati ottenuti, sono: l'applicazione dell'interferometro di Michelson alle misure di diametri stellari la cui grandezza era già stata preveduta dalla teoria (seconda conferenza) e la scoperta, fatta dalla signorina Enrichetta Leavitt, nell'Osservatorio di Harvard, della relazione che passa fra la luminosità e il periodo di certe particolari stelle variabili, contraddistinte col nome di* Cefeidi. *Questa scoperta permise nuovi e piú vasti scandagli delle profondità dell'Universo, e veniva seguita dall'altra di Hubble, della presenza di* Cefeidi *nella nebulosa di* Andromeda, *la quale conseguentemente veniva traslocata in remotissimi spazî; dove si cominciano a contare i milioni di anni-luce (terza conferenza).*

*Il libro di Eddington, nella sua primitiva edizione inglese, si chiude attaccando il problema dell'origine della enorme energia che è distribuita nell'Universo, e quello della evoluzione stellare; problemi che appena appena intravediamo e sono ben*

*lontani dalla soluzione, se la mente umana potrà mai arrivarci. La prima edizione italiana si accresceva di un'altra novità astronomica la quale arricchiva il numero di queste recenti e, possiamo ben dire, favolose conquiste, se consideriamo il poco tempo in cui sono state acquisite. Si tratta della scoperta della materia cosmica sparsa nello spazio interstellare. Essa, già notata da W. Herschel e dal Padre Secchi, ora si osserva non solo direttamente, ma altresí negli spettri delle stelle piú lontane, per mezzo delle righe di assorbimento del calcio ionizzato, il quale è uno dei maggiori costituenti di tale materia oscura. Naturalmente su questa si può fantasticare quanto si vuole, per risalire alla formazione o al disfacimento dei mondi nella gran scala del tempo, che noi molto vagamente ed a stento possiamo immaginare.*

*Formano, tutti questi mondi sparsi a profusione nell'Universo, un universo finito od infinito? La domanda si presenta naturale e la teoria da un lato, l'esperienza dall'altro se ne occupano cercando di risolvere il problema. Recenti scoperte sull'allontanamento sistematico delle nebulose estragalattiche dalla Galassia, e quindi dal nostro sistema stellare, che sembrano una conseguenza logica della relatività, interessano molto gli astronomi ed i fisici, i quali ne discutono con fervore e successo.*

*Alla presente seconda edizione di questo libro si aggiunge, per merito di Rafaele Contu, un altro capitolo appunto sul problema di attualità della espansione dell'Universo. Da una conferenza di Ed-*

*dington alla* "Physical Society", *il Contu ha saputo trarre un riassunto di facile e piacevole lettura, che metterà al corrente i lettori sulla scoperta di questo grande fenomeno che tanto dà e darà da lavorare alle piú alte menti teoriche ed ai piú abili osservatori del cielo.*

*La scoperta dell'allontanamento sistematico delle nebulose, risultata dallo studio del loro spettro, è stata preceduta dalla stessa scoperta fatta dal de Sitter per via teorica, già piú di quindici anni fa, come diretta conseguenza delle teorie di Einstein, e quindi oltre che importante di per se stessa, lo è anche come trionfo, da un lato delle mirabili conquiste nel campo della ricerca sperimentale, dall'altro di quelle nel campo delle speculazioni teoriche. Eddington parlò per la prima volta con dettaglio del problema dell'espansione dell'Universo in una sua conferenza al Congresso dell'Unione astronomica internazionale a Cambridge nel settembre del 1932. Nell'esordio di quella egli diceva queste belle parole che conviene qui ricordare:*

*«Questo è un Convegno internazionale e perciò ho «scelto un soggetto internazionale. Parlerò delle ri«cerche teoriche del tedesco Einstein, dell'olande«se de Sitter, del belga Lemaître. I dati d'os«servazione, li ho dagli americani Slipher, Hub«ble, Humason: ricordando però, che il dato cosí «essenziale della distanza si trova con un metodo do«vuto al danese Hertzsprung. E poiché non «posso dilungarmi sull'analisi matematica, non mi «sarà dato fare onore quanto vorrei all'italiano Le«vi-Civita, a cui dobbiamo le idee e i metodi da*

*« noi impiegati. Ma tengo a ricordare il nuovo inte-*
*« resse che il soggetto viene ad acquistare grazie al*
*« suo collegamento con la meccanica ondulatoria; e*
*« di questa non posso non menzionare qui il creatore,*
*« il francese de Broglie. Il mio tema è il disper-*
*« dersi delle galassie, ma esso unisce tutta la Terra.*
*« Cosí voglia il fato, che nessuna* repulsione cosmica
*« intervenga a dividerci.»*

*Ed oltre a queste parole è bene anche ricordare, che nel medesimo Congresso lo stesso abate Lemaître, ricordato da Eddington, a conclusione di alcune interessanti riunioni, in cui si discussero le piú moderne speculazioni sulla costruzione e costituzione dell'Universo, espose una sua nuova teoria sulla formazione delle nebulose, che porta ad una evoluzione rapidissima tipo* fuoco d'artifizio *al principio, e poi lenta in seguito, nella quale il raggio dell'Universo all'inizio deve essere stato piccolissimo, forse delle dimensioni di un atomo con peso atomico uguale a quello di tutto l'Universo. Se è facile restare increduli davanti ad un tal risultato, d'altra parte pensando che ogni giorno assistiamo a fenomeni della stessa natura, sia pure senza fuochi d'artifizio, nello sviluppo della vita animale e vegetale sulla* Terra, *è certo che la teoria dell'abate Lemaître non ci deve sembrare piú tanto strana.*

*Ma anche se ci vogliamo arrestare a quello che noi possiamo oggi constatare con i nostri già poderosi, ma sempre insufficienti metodi di osservazione, dobbiamo concludere che la concezione dell'Universo, infinito o finito che sia, tale in ogni modo da sorpassare di gran lunga le ipotesi sinora formulate sulle*

*sue dimensioni, è un risultato di grande importanza. Questo, unitamente alla scoperta, dovuta all'Astrofisica, dell'unità della materia che costituisce l'Universo, ci rivela, sia pure in piccolissima parte, la sua creazione divina ed organica, di fronte a cui l'uomo rimane in estatica ed attonita ammirazione.*

*È facilmente prevedibile che la scienza astronomica, tanto nel campo dell'osservazione quanto in quello della teoria, non si arresterà certo a questo punto. Procedendo ogni giorno nel suo cammino, le osservazioni si accumulano alle osservazioni, e ci forniscono nuovi e piú precisi dati, mentre non cambia la via maestra, battuta fino dai tempi di Galileo, sulla quale non si torna indietro. Ciò che può importare a noi, è di far tesoro di queste conoscenze dell'umano sapere, traendone le logiche conseguenze alle quali necessariamente non può fare a meno di arrivare chiunque abbia mente e cuore.*

*GIORGIO ABETTI*

*R. Osservatorio di Arcetri - Firenze*
*Aprile 1934-XII.*

## AVVERTENZE DEL TRADUTTORE

Questo fortunatissimo volume di A. S. EDDINGTON, apparso pei tipi della "Clarendon Press" di Oxford nel 1927 col titolo *Stars and Atoms* (Stelle ed Atomi), è stato edito la seconda volta nello stesso anno, e la terza nel 1928.

La prima edizione comprendeva le prime tre conferenze e l'Appendice A, essendo le conferenze medesime la rielaborazione di quella che, collo stesso titolo del libro, era stata letta al Congresso di Oxford (1926) della *British Association* e di altre tre tenute nello stesso anno al *King's College di Londra.*

La seconda edizione, per il resto uguale alla prima, dava notizia della identificazione del "nebulio" la quale doveva diventare l'oggetto dell'Appendice B aggiunta alla terza edizione.

La prima edizione italiana (1932), intitolata diversamente col consenso dell'Autore, si arricchiva di una conferenza, trasmessa per radio dalla *Broadcasting Corporation* nell'aprile 1929, concernente la materia dello spazio interstellare. Questa seconda edizione (1934) contiene anche, redatto dal traduttore con l'autorizzazione dell'EDDINGTON, un capitolo originale sulla espansione dell'Universo.

Il titolo "Luci dall'infinito" vuole essere la romantica indicazione delle meraviglie dell'analisi spettrale che, interpretando i messaggi recati dalla luce proveniente dai lontanissimi astri e dalle ancor piú lontane nebulose, è essa stessa miracolosa illuminatrice di tanti misteri.

Nelle edizioni italiane, che il prof. Giorgio ABETTI ha voluto confortare di cordiali consigli nella revisione delle bozze — e lo ringraziamo vivamente —, si sono redatti i

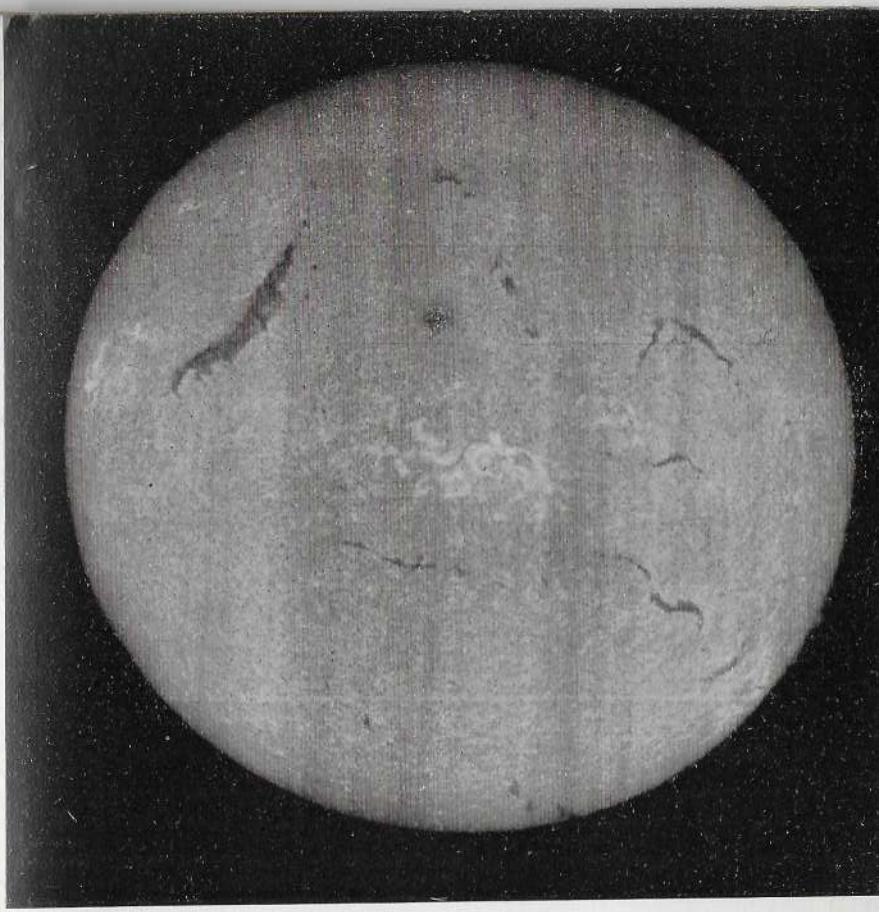
sommari delle conferenze e s'è cercato di collegare le varie parti con opportuni riferimenti di pagina e con qualche aggiunta o nota dove erano necessarî all'organicità del volume. Vi si troveranno in piú anche delle fotografie (alcune forniteci dal prof. ABETTI) contrassegnate con un asterisco e l'indice alfabetico, ripagante forse l'improba fatica del compilatore coll'utilità che ne possono trarre i lettori di libri del genere. I quali pare diventino piacevoli appunto perché non sono sistematici, e cogli indici possono acquistare i pregi nell'ordine a molti non sgradito.

I risultati delle misure, di cui è occorso far cenno, sono nel testo originale espressi, quasi sempre, in miglia, *yards,* piedi e pollici; essendo queste unità pochissimo familiari agli Italiani, le abbiamo qui ragguagliate al nostro sistema decimale. Per la tonnellata inglese, la quale è molto prossima ai mille chilogrammi, non abbiamo creduto invece opportuno od utile questo ragguaglio; per altro non avrebbe modificato l'ordine di grandezza, che è quel che conta là dove, in alcune pagine, vi si fa riferimento.

A riguardo dei grandi numeri: milione, bilione, trilione, ecc., va precisato che il bilione (o miliardo) equivale — secondo l'uso inglese — a un milione di milioni, il trilione a un milione di bilioni, e cosí via.

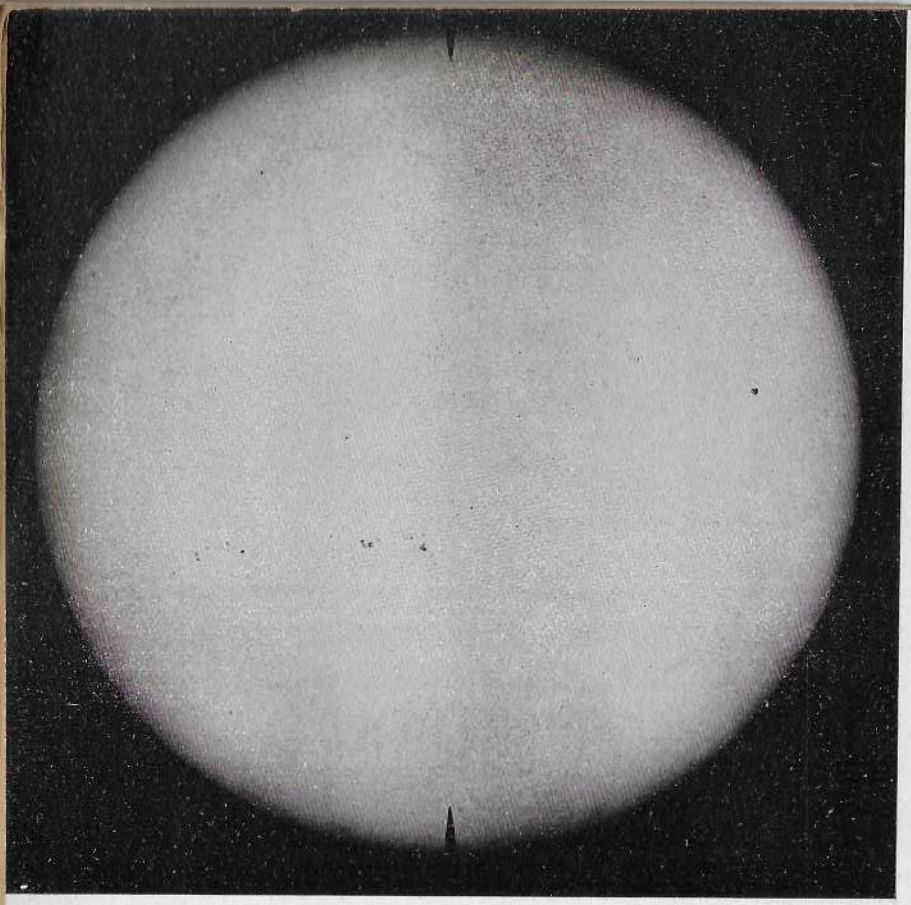
r. c.

Roma, 27 marzo XII.

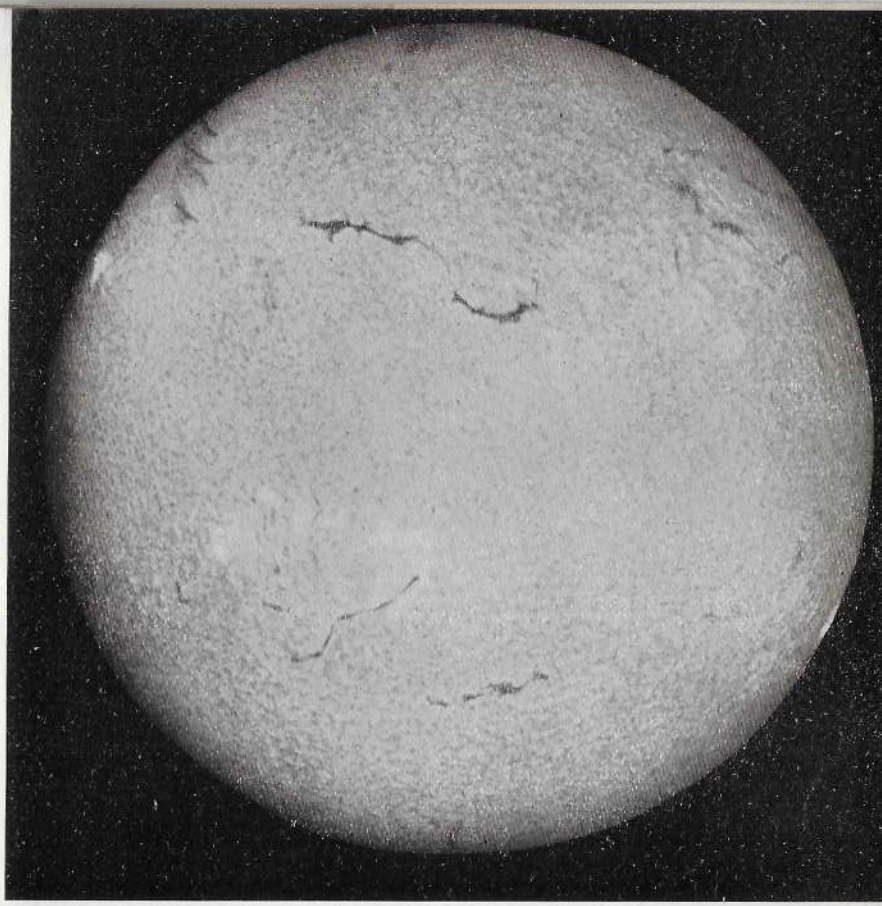


* Fig. 1 — IL SOLE

Fotografia dello strato esterno della cromosfera, ottenuta con la riga Hα dell'idrogeno.
(*Osservatorio di Meudon, 21 marzo 1910*)



* Fig. 2 e 3. — Fotografie del Sole, eseguite a Monte Wilson il 16 giugno del 1926; quella a sinis



inistra è un'immagine diretta, quella a destra l'immagine in luce di idrogeno (riga Hz).

* Fig 4. — Fotografia d'una regione del Sole in luce di idrogeno (riga Hα); è ben visibile il gruppo bipolare di macchie. (*Monte Wilson, 30 agosto 1924*)

# I

# L'INTERNO DI UNA STELLA

L'immensamente grande e l'immensamente piccolo – Spettroeliografia – Equilibrio della materia stellare e calcolo delle temperature – Gli abitanti delle stelle: ioni, raggi X, elettroni liberi – Fotografie delle loro traiettorie – Composizione chimica degli astri e temperatura – La natura e gli zeri – Pressione delle onde eteree sulla materia stellare – Avventure elettroniche – Le " trappole " d'assorbimento delle onde – Teoria e prove del rapporto fra splendore e massa – La materia solare è un gas perfetto – Il mito dell'audacia e della prudenza.

Il *Sole* fa parte d'un sistema che comprende all'incirca tremila milioni di stelle le quali son come globi paragonabili dimensionalmente al *Sole*, vale a dire con diametri dell'ordine di grandezza d'un milione di chilometri. Ma lo spazio che abbraccia e il *Sole* e l'altre stelle ha proporzioni molto maggiori, tanto che codesti corpi celesti vi sono radi, e corrono rischio di scontrarsi, quanto trenta palle da *cricket* vaganti nell'interno d'un recipiente della forma e delle dimensioni della *Terra*. Quest'immensità ci muove cosí a stupore; eppure non raggiunge forse il limite estremo delle grandezze, se, ad esempio, appare sempre piú giustificato ammettere che

le nebulose spirali siano ''universi-insulari'' situati esternamente al nostro sistema stellare. Può darsi che il nostro occhio non colga se non l'elemento unitario d'una organizzazione piú vasta.

Una goccia d'acqua contiene parecchie migliaia di trilioni di atomi, ciascuno col diametro all'incirca d'un decimilionesimo di millimetro. La medesima meraviglia, che ci desta l'immensità del sistema stellare, si ripete cosí per l'immensamente piccolo; e sarà anche piú viva quando avremo da fare con gli elettroni i quali, come i pianeti intorno al *Sole*, si muovono nell'interno dell'atomo, cioè in uno spazio che in rapporto alle loro dimensioni non è meno esteso del sistema solare.

Press'a poco ad un punto intermedio fra gli atomi e le stelle, ma un poco piú vicino ai primi, trova posto per le sue dimensioni una struttura ancor piú sorprendente: il nostro corpo. Costituito di mille quadrilioni di atomi, per trarre il materiale occorrente a costruire una stella ci vorrebbe un numero di corpi umani pari all'incirca al decuplo di questo interminabile numero di atomi.

Dalla sua posizione centrale, l'uomo può però contemplare coll'astronomo le opere piú gigantesche della natura, col fisico le piú piccole. E ci volgeremo insieme verso i due estremi, com'è appunto necessario, giacché lo studio delle stelle e lo studio dell'atomo hanno potuto progredire reciprocamente: l'uno coi notevoli contributi dell'altro.

Fra le stelle, nessuna ci è familiare quanto il *Sole* che, astronomicamente parlando, possiamo quasi dire

d'avere a portata di mano. Lo sappiamo infatti pesare, sappiamo misurarne le dimensioni e la temperatura, e via dicendo, piú facilmente delle altre stelle. Ma mentre queste sono lontane da noi a tal segno che il piú potente telescopio non le può ingrandire in modo da farcele apparire diverse da punti luminosi, riusciamo a fotografare la superficie del *Sole*, e ad averne immagini fantasiose, quali vedonsi nelle figure dall'1 all'8 che con simiglianti aspetti si ripeterebbero anche per le stelle, se queste fossero meno lontane.

È onesto avvertire tuttavia che queste immagini non sono state ottenute coi comuni metodi fotografici. I quali, pur riproducendo con chiarezza le caratteristiche pustole che chiamano ''macchie solari'', non ci darebbero se non immagini scialbe, di scarso interesse. Le fotografie riprodotte nelle figure dall'1 al 5 sono state eseguite, infatti, collo spettroeliografo, magico strumento che coglie una sola varietà di luce, cioè di ben definita lunghezza d'onda, ed ignora le altre. Per effetto di questa selezione, lo strumento distingue gli strati differenti dell'atmosfera solare, ed anziché confondere in un'unica immagine tutti gli strati sovrapposti, ci manifesta il comportamento di uno di essi alla volta. La figura 4, fotografia parziale del *Sole* in luce d'idrogeno e corrispondente ad uno strato elevato, dà un'immagine suggestiva di moti tumultuosi e di vortici, che un meteorologo del *Sole* descriverebbe verosimilmente con espressioni non inconsuete: «Si avvicina una depressione profonda, accompagnata da altre perturbazioni secondarie; probabile il ritorno a condizioni incostanti.»

Mentre potrebbe aggiungere, in ogni caso e con sicurezza, questa previsione: «temperatura elevatissima»: in regime ciclonico od anticiclonico, una temperatura all'incirca di 6000 gradi centigradi.

Non ci attarderemo, pel momento, né sugli strati superficiali né sull'atmosfera del *Sole*, che sono stati il campo di numerose e notevoli scoperte recenti, molte delle quali adatte a segnare fecondi rapporti fra le stelle e gli atomi. Poiché ci sentiamo piú di casa sotto la superficie, affrettiamoci a penetrarvi. Cosí, dopo la fugace visione dell'inconsueto paesaggio, ci immergeremo nei profondi strati solari, ove l'occhio non penetra e bensí la mente sa leggere un poco, col sussidio del ragionamento scientifico.

## LA TEMPERATURA INTERNA D'UNA STELLA

La matematica ci offre la possibilità di determinare in quale misura aumenta la pressione dalla superficie verso l'interno del *Sole*, e di stabilire quanto deve crescere la temperatura per fare equilibrio agli effetti della maggior pressione. All'istesso modo che l'architetto calcola gli sforzi interni ai quali si trovano sottoposte le strutture del suo edifizio, senza tuttavia aprire dei fori d'assaggio, poniamo, in una colonna, cosí l'astronomo non ha bisogno di trivellare pozzi nel *Sole*, per riconoscere le tensioni e le pressioni che operano nell'interno

dell'astro. Ma certo stupisce che il calcolo da solo basti ad indicarci la temperatura solare, e ben naturalmente vedremmo accolta con diffidenza la nostra pretesa di determinare la temperatura del centro d'una stella; tanto piú, dichiarando subito le cifre che attualmente se ne dànno. È quindi preferibile esporre anzi tutto in qual modo le si è ottenute; e questo faremo, lasciando da parte gli inutili particolari, ma col proposito di dire tutto quello che abbisogna e colla speranza di convincere il lettore che v'è una guida per giungere a queste cognizioni, la quale può essere seguíta da vicino mediante adeguati metodi matematici.

Non sarà fuori luogo ricordare, cominciando, che il calore d'un gas deriva sostanzialmente dall'energia di moto delle sue particelle. Esse vanno rapide qua e là in tutte le direzioni, e si urtano, e tendono a disperdersi disordinatamente, onde il gas è appunto dotato della forza d'espansione, od elasticità, a tutti nota per l'applicazione che ne fa il guidante quando gonfia le camere d'aria di un'automobile.

Orbene, immaginiamo di trovarci in un punto profondo d'una stella, e di guardare in alto verso la superficie o in basso verso il centro. Qualunque sia il punto scelto per la nostra osservazione ideale, lo troveremo sollecitato da due opposte tendenze: una, data dal peso degli strati sovrastanti che premono all'ingiú, cercando di comprimere man mano il gas contenuto nello spazio sottostante; l'altra, costituita dall'elasticità del gas contenuto inferiormente, il quale tende a dilatarsi e preme contro gli strati che lo costringono, cosí da spingerli in alto.

Ma poiché non si manifesta alcun effetto dipendente dall'azione di queste due tendenze, e la stella non sembra abbia subíto sensibili trasformazioni in un periodo di centinaia d'anni, quale possiamo agevolmente considerare, è logico supporre che le due tendenze si facciano equilibrio; che, in qualsiasi punto, l'elasticità sia giusto quella occorrente a compensare il peso degli strati gassosi superiori; che, infine, si possa calcolare la quantità di calore posseduta dal gas, esistendo uno stretto rapporto fra essa e l'elasticità. Riusciamo cosí a determinare il grado di calore, o temperatura, che corrisponde ad un punto qualsiasi d'una stella.

Le cose dette possono essere esposte un po' diversamente. Volgiamo la nostra attenzione ancora ad un punto interno della stella, e cerchiamo di spiegarci come si regga la materia degli strati sovrastanti che, in mancanza d'un sostegno, cadrebbe verso il centro a causa della gravitazione. L'indispensabile sostegno è dato dalla successione dei piccoli urti prodotti dalle particelle gassose sottostanti. Le particelle medesime, come si muovono in disordine ed in tutte le direzioni per effetto dell'energia calorifica, colpiscono di continuo la materia sovrastante: gli urti, succedendosi a brevi intervalli di tempo, sostengono la materia press'a poco al modo indicato dal giuoco che chiamano del ''volano'' o, per citare un altro esempio, come le automobili trovano il loro supporto nell'aria dei propri pneumatici. Se la temperatura sale, è segno che è aumentata altresí l'attività delle particelle; e gli urti si sono fatti piú rapidi ed intensi. Però è chiaro che dovremo assegnare alla tem-

peratura quel preciso valore per cui la somma totale degli urti non sia né troppo grande né troppo piccola rispetto a quella necessaria per mantenere in equilibrio stabile la materia sovrastante; ed è questo il principio che governa il nostro metodo pel calcolo delle temperature stellari.

Cosí il problema sarebbe formulato nei suoi termini essenziali, se la forza totale che sostiene la materia non dipendesse, oltre che dall'attività delle particelle, anche dal loro numero; cioè, rispettivamente, e dalla temperatura e dalla densità della materia solare in un qualsiasi punto interno dell'astro. Il matematico che si proponga di risolvere il problema, trovando nelle sue formule un elemento ignoto — la densità — lo dovrà ricavare mediante ipotesi; e alla stregua di queste vien giudicata la sua valentia.

Seguiamolo in questo procedimento. Egli conosce, intanto, la massa del *Sole*, cioè la quantità totale della materia da cui è costituito l'astro; piú ne ammetterà in una regione, e meno ne potrà assegnare alle altre. Come capiterebbe all'incauto generale che, avendo ai suoi ordini mille soldati per guarnire la fronte d'un chilometro, li ammassasse nei primi trecento metri, lasciando sforniti gli altri settecento. Il matematico potrà quindi vedere che cosa avvenga valutando ad esempio la temperatura a meno di dieci milioni di gradi centigradi, ciò che pone un limite all'attività di ogni particella. Raggiunta idealmente una profondità solare molto notevole, per spiegarsi come possa essere sostenuta tanta materia, cospicua appunto in conseguenza della profondità, egli deve

invocare un gran numero di particelle, cosí da ottenere il necessario impulso totale. Si accorgerà allora che, impiegate troppo presto le particelle di cui disponeva, non gliene resta nessuna pel centro: l'edifizio, non potendo poggiare su niente, crollerà come una casa cui venga a mancare, ad un certo punto, il terreno.

È facile capire, sviluppando questo ragionamento, che una stella avente le dimensioni solari non potrebbe essere stabile a meno di ammettervi un'attività, od una temperatura, superiore ai dieci milioni di gradi centigradi.

Non contento di fissare questo limite inferiore, il matematico potrà fare un passo innanzi, stabilendo all'incirca come le temperature si distribuiscano nell'interno dell'astro. Terrà però conto dell'impossibilità d'una distribuzione discontinua, giacché la temperatura si propaga da un luogo all'altro e, al pari d'un dislivello nel liquido contenuto in diversi vasi comunicanti, un salto brusco di temperatura, nella stella in cui per avventura si formasse, verrebbe quasi repentinamente eliminato.

Rinunziando a seguire i matematici nel districare la matassa di queste considerazioni, saremo paghi d'aver mostrato intanto per qual verso il problema possa essere affrontato. In virtú dei risultati di questo metodo d'indagine — che, inaugurato piú di cinquant'anni fa, ha subíto, com'era naturale, sviluppi e correzioni graduali — possiamo presumere di conoscere approssimativamente la reale distribuzione delle temperature nell'interno d'una stella.

Abbiamo accennato ad una temperatura di seimila gradi centigradi. È quella che regna sulla su-

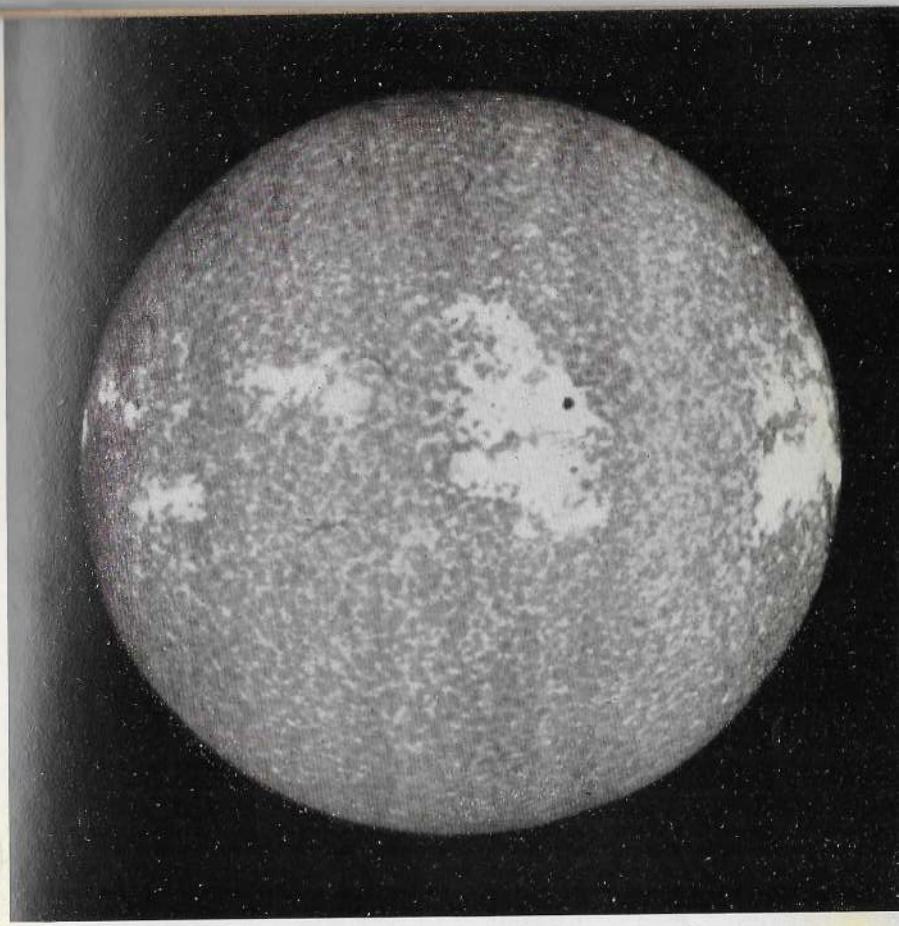
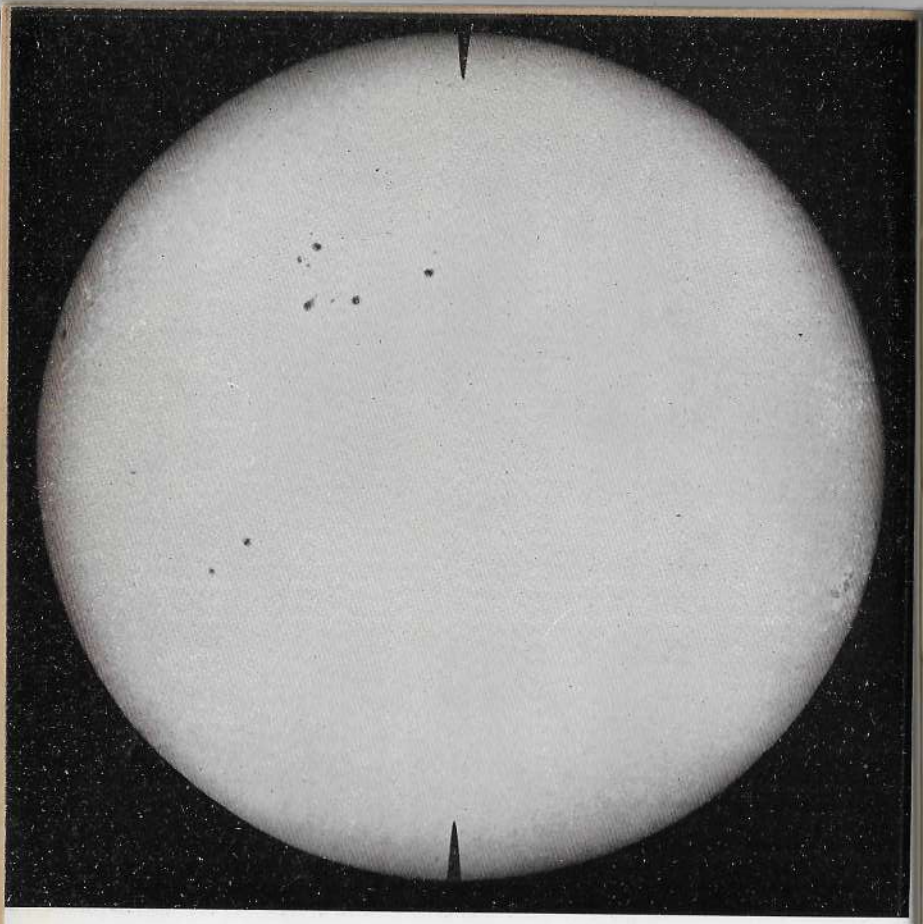
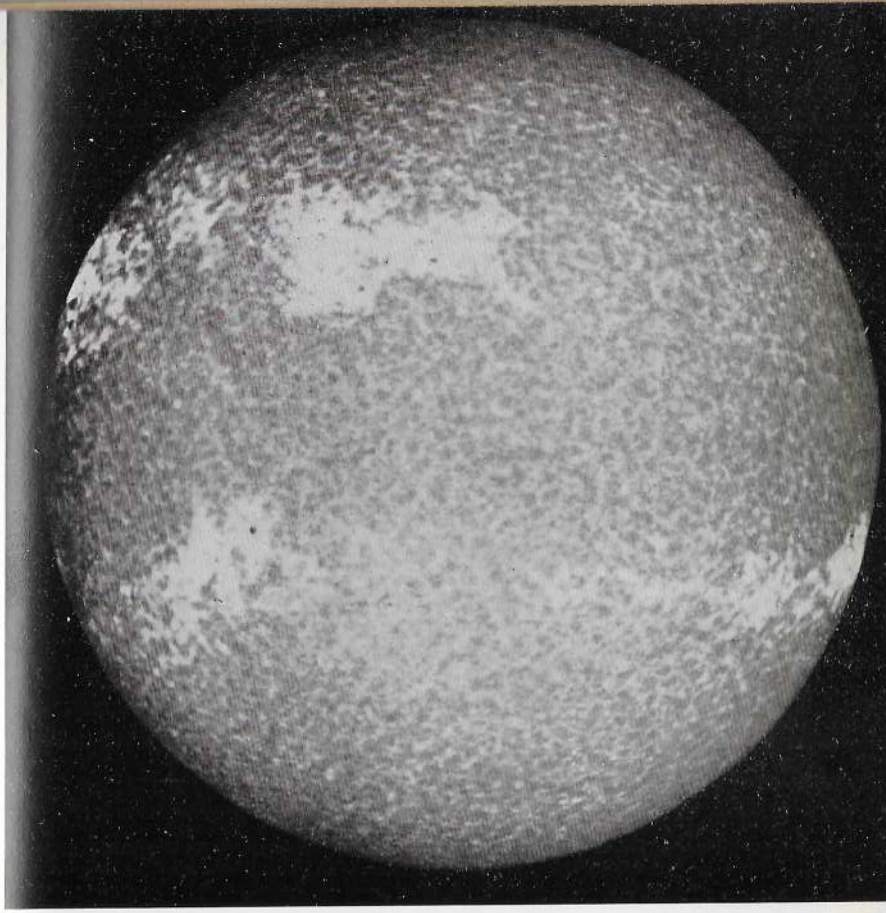


Fig. 5. — IL SOLE

Fotografia in luce di calcio (riga $K_3$). — Gioverà confrontarla colle figg. 1, 2 e 3.
*(Osservatorio di Meudon, 17 dicembre 1929)*



* Fig. 6. — Fotografie del Sole, eseguite a Monte Wilson l'1 gen



nnaio 1926. A destra, l'immagine in luce di calcio (riga K).

* Fig. 7. — Spettroeliografia in luce di idrogeno (riga Hα), ottenuta nella Torre solare di Arcetri (Firenze) il 28 febbraio del 1928.

* Fig. 8. — Gruppo bipolare di macchie del Sole, fotografato, colla riga Hα dell'idrogeno, dalla stessa Torre solare di Arcetri, il 30 agosto 1924.

perficie solare a noi visibile, e la possiamo osservare direttamente, col medesimo metodo che usa nelle industrie per la misura esterna della temperatura d'una fornace; mentre i difficili calcoli teorici intervengono solo quando occorra conoscere la temperatura delle regioni profonde, nascoste alla vista e quindi all'osservazione diretta. La temperatura di seimila gradi s'appartiene alla camicia esterna della grande fornace di Febo, e non dà nemmeno una pallida idea dell'enorme intensità della temperatura interna, la quale repentinamente sale a piú d'un milione di gradi e, crescendo man mano, quasi tocca i quaranta milioni al centro dell'astro.

Non si voglia tuttavia immaginare che una temperatura elevata com'è quella di quaranta milioni di gradi sia tale che la nozione fisica connessa al termine si trovi perciò a non aver piú senso. Bisogna invece intendere il termine nel suo significato letterale. Infatti, il calore d'una sostanza (Pag. 5) è l'energia di moto dei suoi atomi o delle sue molecole, e la temperatura, che indica il grado di calore, è come la spia della velocità di codesti movimenti. Ad esempio, la temperatura di questa sala dichiara che le molecole dell'aria in cui siamo immersi si muovono all'approssimata velocità di cinquecento metri al secondo; se miracolosamente potessimo ottenere qui dentro una temperatura di quaranta milioni di gradi, varrebbe quanto dire d'essere riusciti ad imprimere alle medesime molecole una velocità di oltre centocinquanta chilometri al secondo. Né, invero, questa cifra deve sgomentare: agli astronomi sono pur consuete velocità dello stesso ordine, se le stelle si muovono, e i bolidi penetrano nella nostra atmo-

sfera, a velocità di regola comprese fra i quindici e i centocinquanta chilometri al secondo; se il moto di rivoluzione della *Terra* intorno al *Sole* si compie all'incirca alla velocità di trenta chilometri al secondo. Per un astronomo, le velocità di questa grandezza sono comunissime e però la temperatura di quaranta milioni di gradi, che sottintende cosí rapidi moti, lo trovano affatto impassibile. Che dire poi del fisico sperimentale? Abituato a trattare cogli atomi che il radio e le altre sostanze radioattive emettono alla velocità di quindici o ventimila chilometri al secondo, riterrà a buon diritto che la velocità di centocinquanta chilometri sia quasi trascurabile. E, distraendosi da codesti espressi atomici per guardare alle stelle, deve porre anche il loro timido trotto fra gli eventi banali.

Oltre agli atomi correnti in disordine ed in tutte le direzioni, nell'interno delle stelle trovano altresí posto moltitudini di onde (vibrazioni dell'etere), anch'esse correnti alla rinfusa. Le quali sono distinte, ed assumono nomi diversi, a seconda della lunghezza d'onda: le piú lunghe, usate nelle radiotrasmissioni, od onde hertziane; poi le onde calorifiche od infrarosse; di seguito le comuni onde luminose dal rosso al violetto, i raggi ultravioletti od attinici che son capaci di impressionare le lastre fotografiche; i raggi X; e, molto corti, i raggi *gamma* emessi dalle sostanze radioattive. Ma le vibrazioni piú corte son forse quelle costituenti la "radiazione penetrante"[1]

[1] Mentre non si conosce ancora l'origine e la provenienza di questa radiazione, le ricerche piú recenti (1934) conducono a farla considerare costituita sovrattutto da corpuscoli carichi di elettricità positiva: per intenderci, da "elettroni positivi" (*C*).

scoperta nella nostra atmosfera e studiata, fra gli altri, dal KOHLHOERSTER e dal MILLIKAN che ne suppongono l'origine negli spazî interstellari (Pag. 134). Codeste onde sono tutte del medesimo genere; ma, in rapporto al numero di vibrazioni che gli corrisponde, vanno distinte in varie e numerose ottave, ad una delle quali soltanto si può dire sensibile il nostro occhio, cieco invece alle altre che, come dicevamo, dan luogo tuttavia a radiazioni della stessa natura di quelle comprese fra il rosso ed il violetto.

Le onde eteree correnti nell'interno delle stelle sono raggi X, quali vengono prodotti negli appositi tubi "a vuoto", ma in media con lunghezza d'onda piú lunga, cioè piú molli, dei raggi X usati dal medico o dal chirurgo, e non di quelli che ricorrono nelle esperienze di laboratorio. Cosí va riconosciuto nelle stelle qualche cosa con cui abbiamo già dimestichezza in virtú di molteplici esperimenti terrestri.

Oltre agli atomi ed alle onde eteree, altri abitanti si uniscono alla danza: elettroni liberi a miriadi, corpuscoli come non ve n'ha di piú leggeri, giacché ciascuno di essi pesa appena 1 : 1840 dell'atomo piú leggero conosciuto, cioè l'idrogeno. L'elettrone non è che un'errabonda, solitaria carica negativa; e nell'atomo lo troviamo sia a far parte del pesante nucleo, sia per cingere il nucleo medesimo. Spesso l'atomo è stato rassomigliato ad un sistema solare in miniatura, e l'analogia annunzia e rispetta la natura lacunale dell'atomo, se il nucleo vien considerato come il *Sole*, e gli elettroni come i pianeti. Siccome poi in ogni specie di atomo, cioè in ogni elemento chimico, v'è un numero ben determinato,

e diverso da specie a specie, di elettroni esterni al nucleo, un'immagine approssimata del nostro sistema solare può essere ricercata nell'atomo del fluoro. Questo, infatti, ha nove elettroni — come appunto li chiamano — ''planetari''.

La fisica che concerne le esperienze terrestri di regola considera la cintura o ''crinolina'' elettronica come una parte essenziale dell'atomo, perché di rado abbiamo che fare con atomi incompletamente acconciati. Non è tuttavia difficile imbatterci in atomi con uno o due elettroni di meno, e si chiamano allora ''ioni''. Nella ridda tumultuosa che agita l'interno delle stelle, sarebbe davvero strana la nostra pretesa di voler trovare gli atomi agghindati di tutto punto, come appaiono alle piú tranquille visioni terrestri. Essi hanno perduto lassú una certa quantità di elettroni planetari, e sono, per esprimerci corretto, veri e propri i o n i[1].

## LA IONIZZAZIONE DEGLI ATOMI

A cosí elevata temperatura dell'interno d'una stella, invero accade che, per effetto del reciproco martellare dei corpuscoli, e piú particolarmente delle collisioni fra le onde eteree (raggi X) e gli atomi, questi si disgreghino ed emettano elettroni; i quali, in tal modo liberati, costituiscono il terzo ceto di abitanti cui dianzi alludevamo.

---

[1] Ricorderemo che "ione" viene dal greco, indicando qualcosa che si muove (*C*).

Ma questi elettroni potranno godere della loro libertà solo temporaneamente: ciascuno diverrà tosto preda d'un qualche atomo mutilato, non senza che nel frattempo un altro elettrone, proveniente da altre disgregazioni prodottesi altrove, prenda il suo posto fra i liberi abitanti stellari. Il processo che chiamano ionizzazione, ed è importantissimo per lo studio delle stelle, consiste appunto nella liberazione di uno o piú elettroni dall'atomo.

Essendoci proposti di parlare di stelle ed atomi, alle fotografie stellari che abbiamo già visto ne aggiungeremo pure di atomiche, oggi ottenute con molta facilità. Ma, si pensi un po', nel tenuissimo frammento d'una sostanza qualsiasi vi sono milioni e milioni di atomi. Se il fotografo li volesse cogliere tutti insieme, finirebbe col darcene un'immagine tanto confusa che non riusciremmo a discernerne alcuno: per fortuna, la fotografia seleziona i suoi soggetti, e coglie soltanto gli atomi "espressi" dalla scia infuocata come le meteore. Bastano un minuscolo frammento di radio ed opportuni accorgimenti, perché sul campo della macchina fotografica cada un numero molto esiguo di questi velocissimi atomi; avremo cosí un'immagine nitida di ciascuno di essi.

Nella figura 9 è l'immagine di tre o quattro atomi, o meglio l'immagine di altrettante e ben marcate traiettorie rettilinee di atomi d'elio, proiettati ad alta velocità da una sostanza radioattiva.

Osservando queste tracce, taluno potrebbe supporvi gli effetti ingegnosi d'un trucco fotografico. Come può avvenire che esse ci manifestino degli

atomi?; che si tratti veramente dei piccolissimi corpuscoli considerati, non sono molti anni, quali concetti teorici e privi di consistenza reale? Ebbene, la macchia che sa di sporco sulla fotografia, è il pollice d'un individuo? Se viene riconosciuta come tale, possiamo anche soggiungere tranquillamente che le tracce visibili nella stessa fotografia son degli atomi. Ma gli ipercritici non si dànno certo per vinti, e bisogna precisare: « Sí, quella macchia non è il pollice d'una persona; è l'impronta lasciata dal pollice di qualcheduno.» Quindi, fatti piú circospetti, potremo dimostrare come i fuscelli che campeggiano sulla fotografia siano le tracce del passaggio di atomi. Cioè, la fotografia non rappresenta l'immagine d'un atomo, ma dell'impronta d'un atomo; non l'immagine d'un pollice, ma l'immagine dell'impronta d'un pollice. Non conta, invero, che queste immagini siano di prima o di seconda mano; né riusciamo a persuaderci d'essere colpevoli d'artifizio piú del criminologo che, per accrescerne la visibilità, cosparge di polvere le impronte digitali, o del biologo che, al medesimo scopo, colora i suoi preparati.

Dobbiamo al prof. C. T. R. Wilson d'aver trovato il modo di vedere la scia che lascia l'atomo al suo passaggio: a simiglianza dei segugi che rifanno la pista della selvaggina, col metodo dell'Wilson il vapor d'acqua può ricostruire plasticamente le traiettorie atomiche, condensandosi lungo di esse in piccole gocce.

Per chi ha e piú desidera, ecco nella traccia sinuosa all'angolo superiore destro della figura 9, la fotografia d'un elettrone. Questo, a causa della lieve

massa, devia dal suo cammino con maggiore facilità del pesante atomo che, come un toro, si scaglia infuriato contro gli ostacoli. Nella figura 10, gli elettroni son piú numerosi, ed uno di essi, correndo velocissimo, ha segnato una traiettoria rettilinea. Occasionalmente, la medesima figura illustra il processo seguíto per rendere visibili le tracce dei corpuscoli: vi si scorgono infatti, e sono distinte l'una dall'altra, tenui gocce d'acqua.

Fermandoci a questo punto non avremmo mostrato tutte le fotografie dei varî ceti d'abitanti stellari: mancherebbero quelle dei raggi X, che si possono ricavare con qualche approssimazione e non sono naturalmente da confondere colle notissime fotografie ottenute mediante i raggi X. Dicevamo che i raggi X, quando collidono cogli atomi, riescono a liberarne degli elettroni. E questi, appunto allora, per effetto dell'alta velocità d'emissione, si comportano quali elettroni ''espressi'', sicché riesce di fotografarli. Ecco nella figura 11 quattro elettroni proiettati in tal modo, coi punti di partenza situati lungo la medesima retta ideale. Su questa, e non occorre all'uopo molta fantasia, è possibile immaginare la misteriosa potenza che, provocando le esplosioni, libera insieme gli elettroni: uno stretto fascio di raggi X i quali, durante la posa fotografica, erano diretti secondo quella linea, e da destra verso sinistra. Non vediamo i raggi, e bisognerà accontentarsi di immaginarli, ma la fotografia ci fa vedere il processo di ionizzazione, cioè come gli elettroni vengano liberati dagli atomi contro i quali si trovano a collidere i raggi X. Si trovano sí, erranti, trilioni

d'atomi, sebbene la fotografia non li colga; ma i raggi devono compiere lunghi percorsi prima di scontrarsi con uno di essi e farlo esplodere; però, che un raggio X incontri un atomo e lo ionizzi, è un poco frutto del caso.

Gli atomi possono trasformarsi in ioni, venendo frantumati in certa guisa piú meccanicamente, anche per effetto dei loro urti con elettroni rapidi. Osservando la figura 12, scorgiamo una serie di goccioline sparse e rade; le quali, a prima vista slegate, sono invece disposte lungo una linea press'a poco orizzontale, che è appunto la traiettoria d'un elettrone rapido. Questo, disgregando alcuni atomi incontrati per via, ha strappato a ciascuno un elettrone, ed ecco perché le goccioline sono a coppie. L'una segna l'elettrone liberato, l'altra l'atomo cui apparteneva l'elettrone medesimo; ma non sappiamo a quale goccia corrisponda, ad esempio, l'atomo. La violenza del rapido proiettile elettronico qualche volta è tale che all'urto segue qualcosa di confuso e di indiscernibile; di regola riusciamo tuttavia a distinguere le due parti provenienti dal frantumarsi dell'atomo [1].

A questo punto, potrà esservi chi mormori con sarcasmo che, insomma, trattar dell'interno delle stelle è un'impresa pacifica, perché lo si fa al sicuro dai

---

[1] Se le particelle appaiono nella fotografia, ciò è dovuto, anzi tutto, alla loro carica elettrica, e non alla elevata velocità. Una particella molto veloce lascia dietro di sé una successione di particelle cariche di elettricità; ed appunto viene rivelata dal corteo di queste vittime della sua folle corsa.

Fig. 9. — Traiettorie di atomi d'elio proiettati ad alta velocità. Chi vorrà negare che la ampia macchia sia un'impronta digitale?

Fig. 10. — Traiettorie di elettroni muoventisi ad elevate velocità.

(*Fotografie di C.T.R. Wilson*)

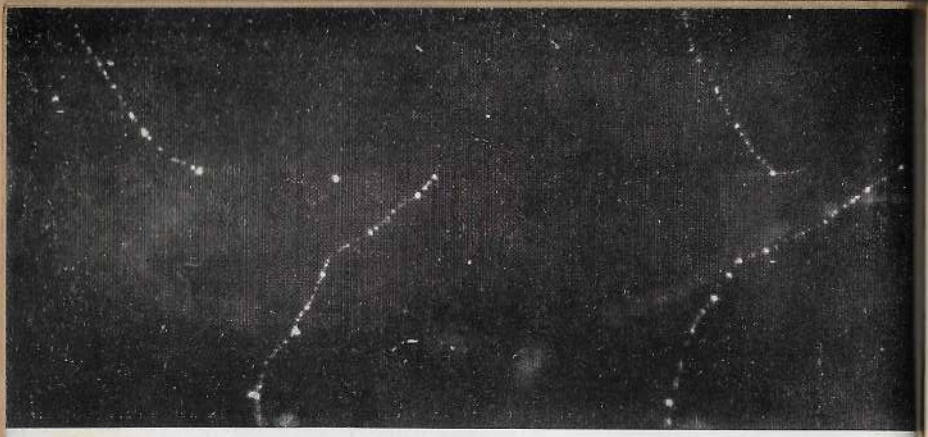


Fig. 11. — Ionizzazione prodotta mediante i raggi di Roentgen.

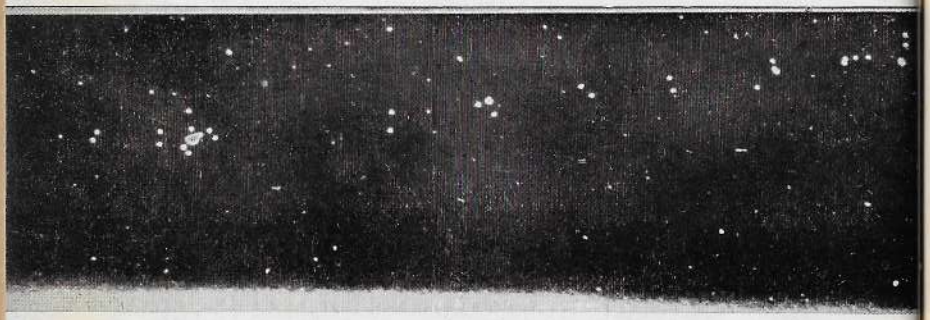


Fig. 12. — Ionizzazione per collisione.
(*Fotografie di C. T. R. Wilson*)

controlli (Pag. 41). È vero: nessuno può andare a vedere che cosa di fatto avviene lassú, per ridiscenderne a provare il nostro errore. Ma non si abusa delle illimitate facoltà dell'immaginazione se, alla fin dei conti, domandiamo soltanto di ammettere nell'interno delle stelle l'esistenza di oggetti i quali ci sono già familiari e di riconoscervi la sede di fenomeni che si lasciano cogliere dall'obbiettivo del fotografo. Né al proposito avrebbe ragione chi si facesse ad invocare che la natura ha fantasia piú ricca dell'uomo, e che le stelle celano fenomeni inattesi, capaci di sconvolgere le nostre idee. Se la scienza avesse dovunque supposto ostacoli ignoti, forse non avrebbe progredito mai. Possiamo certo incontrare sulla nostra strada una svolta che interrompa il guardar lontano; ma sporgendoci alquanto vediamo spesso che non si nascondeva nulla di veramente eccezionale.

Immergendoci nelle profondità delle stelle, non vogliamo solo ammirare il mondo fantasioso che per le sue condizioni trascende la comune esperienza, bensí scoprire l'intimo meccanismo onde le stelle si comportano come fanno. Per capire i fenomeni che si svolgono alla superficie delle stelle, e capire perché «un astro è differente da un altro per splendore»[1], dobbiamo scendere nella ''sala delle macchine'', e cercarvi la sorgente della corrente di calore e di energia che si spande attraverso la superficie. A questa saremo ricondotti dalla teoria e, col sussidio

[1] *One star differeth from another star in glory.* (PRIMA LETTERA AI CORINTI, *15*, 40.)

di confronti coll'esperienza, giudicheremo allora se abbiamo sbagliato oppure no. Intanto, non sarà lecito né concludere recisamente d'aver visto chiaro, né supporre *a priori* qualchecosa che l'esperienza di laboratorio non abbia già annunziato.

I raggi X esistenti nelle stelle son della medesima specie (Pag. 11) di quelli che sperimentiamo nei laboratori, ma — è naturale — immensamente piú numerosi: pur potendosi, come avviene, produrre artificialmente raggi di ROENTGEN simili ai raggi X stellari, sarebbe vano sperare di ottenerne in eguale abbondanza. La figura 11 concerne un fascio di raggi X, prodotti appunto in laboratorio, che ad atomi diversi hanno strappato quattro elettroni, tutti pronti a farsi catturare da altri atomi. Poiché nelle stelle si dànno intensità che sono milioni di volte maggiori di quelle del laboratorio, gli elettroni vengono rapidamente strappati come essi si fissano, e gli atomi ai quali appartenevano restano quasi nudi.

La mutilazione atomica, pressocché completa, interessa lo studio delle stelle principalmente per due ragioni. Diciamo, intanto, della prima. L'architetto, dovendo esprimere la sua opinione sul progetto d'un edifizio, vuole sapere con quali materiali sarà eseguito il progetto medesimo: e se col legno, l'acciaio, lo stagno, o putacaso colla carta. All'istessa guisa, prima di studiare i particolari costruttivi dell'interno d'una stella, fa d'uopo conoscere se la stella sia fatta d'un materiale pesante come il piombo, o d'un materiale leggero come il carbonio. Sovviene alla bisogna lo spettroscopio, coi suoi numerosi e

fecondi ragguagli sulla composizione chimica dell'atmosfera del *Sole*. Ma sarebbe illusorio il credere di potere comporre di conseguenza un autentico campione dell'intera massa solare; sarebbe tanto piú azzardato dedurne la specie degli elementi predominanti nel cuore dell'astro; ed andremmo a finire in un vicolo cieco, se non sapessimo che gli atomi, quando sono completamente frantumati, si comportano tutti press'a poco nel medesimo modo, almeno a riguardo delle proprietà che interessano l'astronomia.

Proprio l'elevata temperatura, che dapprima ci aveva fatto quasi sgomenti (Pag. 9), rischiara l'orizzonte, eliminando molte differenze esistenti fra le diverse specie di materia: la struttura d'una stella diventa cosí una questione fisica di inattesa semplicità, mentre alle basse temperature, cioè a quelle terrestri, la materia assume proprietà complesse ed imbarazzanti. Poiché gli atomi stellari son privi di vesti come i selvaggi, ed ignorano le distinzioni di ceto tanto gradite agli atomi terrestri che si agghindano di esperti ornamenti, continueremo le nostre indagini senza preoccuparci della composizione chimica dell'interno dell'astro. Basterà però escludere una sproporzione eccessiva, rispetto agli altri elementi, dell'idrogeno, che si comporta in certo suo modo caratteristico: qualunque elemento dominasse degli altri 91, i risultati ai quali perverremmo non manifesterebbero notevoli divari[1] [v. Prefazione].

---

[1] La serie degli elementi comprende, infatti, 92 posti; i quali sarebbero tutti assegnati, se non fosse di qualche dub-

L'altra ragione, su cui avremo modo di tornare, consiste in ciò, che gli atomi stellari vanno considerati quali frammenti di atomi voluminosi, con una crinolina elettronica ricca al pari di quella degli atomi terrestri che abbiano subíto una mutilazione; e quindi che, in rapporto alle proprietà connesse alle dimensioni atomiche, il modo di comportarsi dei gas stellari non è per niente quello dei gas terrestri.

Per illustrare la parte che, nelle nostre ricerche, va attribuita alla composizione chimica d'una stella, sarà utile esaminare di nuovo il modo in cui gli strati gassosi superiori sono sostenuti dal gas sottostante. Ad una data temperatura ciascun corpuscolo indipendente concorre al sostegno, per proprio conto e nella medesima misura, qualsisiano la sua massa e la natura chimica: gli atomi piú leggeri, quindi di massa inferiore, si muovono invero piú rapidamente, e però, secondo quanto insegna la chimica sperimentale e vien giustificato dalla teoria del MAXWELL e del BOLTZMANN, producono lo stesso effetto degli atomi piú pesanti che si muovono con minore rapidità.

Immaginiamo di avere impostato i nostri calcoli di determinazione della temperatura, dapprima partendo dall'ipotesi che il *Sole* sia costituito per intero di atomi di argento, ed in un secondo tempo sostituendo l'argento coll'alluminio, che è quattro volte piú leggero. Supponendo quattro atomi d'alluminio

---

bio mosso a riguardo dell'identificazione di taluni elementi che non si riuscirebbe piú a ritrovare. Il ragionamento dell'EDDINGTON, tuttavia, conserva intatto il suo valore (*C*).

al posto di un atomo d'argento, la massa solare non varia; ma la forza di sostentamento risulta quadruplicata, e la materia costituente il *Sole* verrebbe sollevata verso l'esterno. Fortunatamente si tratta di una esperienza ideale, e per giunta imperfetta, giacché s'è trascurata l'attività meccanica delle singole particelle. La massa riacquista invero il suo stato d'equilibrio quando, sostituito l'argento coll'alluminio, si abbia altresí cura di ridurre quest'attività delle particelle a un quarto dell'attività primitiva. Ciò vale quanto dire che le temperature da assegnarsi all'astro, nell'ipotesi che esso sia composto di alluminio, discenderanno ad un quarto di quelle consentite nell'ipotesi d'un *Sole* d'argento. È chiaro insomma che, variando comunque la composizione chimica ed ammettendo integri tutti gli atomi, la stima della temperatura interna solare debba subire notevoli variazioni.

Ma se degli elettroni vengono strappati agli atomi, agendo come corpuscoli indipendenti concorrono anch'essi a sostentare gli strati superiori; e ciascuno, anzi, nella medesima misura d'un atomo, pel fatto che, sebbene di massa piú piccola, ha una velocità cento volte maggiore. Alla rottura di un atomo d'argento si liberano 47 elettroni che col nucleo sommano a 48 corpuscoli; alla rottura d'un atomo di alluminio si liberano invece 13 elettroni, o in complesso 14 corpuscoli per atomo e 56 per tutt'e quattro gli atomi occorrenti a formare la medesima massa d'un atomo di argento. Per ciò, sostituendo l'alluminio disgregato all'argento pur esso disgregato, disporremo di 56 corpuscoli anziché di 48 e, fatte le de-

bite proporzioni, la temperatura dovrà essere ridotta del 14 %. Cosí la stima della temperatura interna degli astri[1] è ancora soggetta a questa incertezza; che è nondimeno piú tollerabile di quanto non fosse il fattore 4, introdotto nei calcoli basati sull'ipotesi dell'esistenza di atomi integri.

La ionizzazione, che nei modi già detti avvicina i risultati derivanti dal considerare elementi chimici diversi, facendo aumentare il numero dei corpuscoli di sostegno abbassa in misura notevole le temperature calcolate altrimenti. Non bisogna quindi credere che le temperature elevatissime attribuite oggi all'interno d'una stella costituiscano una novità sensazionale. Nuove non sono, se i primi ricercatori, trascurando e la ionizzazione e la pressione della luce di cui diremo subito, giungevano a temperature molto piú elevate di quelle ammesse attualmente.

---

[1] Sostituito l'argento con altri elementi, le variazioni non assumono perciò valori piú sensibili e, ammettendo miscugli di parecchi di essi, è lecito presumere differenze anche piú lievi. Escludendo l'idrogeno, la variazione piú notevole ha luogo allorché i 48 corpuscoli derivanti dall'argento vengano sostituiti cogli 81 derivanti da una massa equivalente di gas elio. Abbiamo escluso l'idrogeno perché, colla disgregazione di un numero d'atomi tale da formare una massa equivalente a quella dell'atomo d'argento, dai 48 corpuscoli giungeremmo ai 216; e la sproporzione è cosí grande che ci dobbiamo aspettare risultati differentissimi da quelli annunziati e per l'argento e per l'alluminio e per l'elio.

## PRESSIONE DI RADIAZIONE E MASSA

Le stelle vanno distinte fra loro in rapporto alla massa, cioè alla quantità di materia di cui sono costituite; per altro le differenze non sono cosí notevoli come farebbe supporre la numerosa varietà degli splendori. Determinata mediante misure astronomiche la massa di molte stelle — non di tutte —, quella solare, se vogliamo dire di una, è risultata di tonnellate 2.000.000.000.000.000.000.000.000.000.

Abbiamo contato bene il numero degli zeri? Sono ventisette. Ma, perdendone uno o due per via, od acquistandone altrettanti, chi se ne accorgerebbe se non la Natura che, quando le stelle furon create, dovette certo badare a mettere insieme un numero esatto di zeri? Ad ogni stella, in altre parole, è stata assegnata una definita quantità di materia. E sebbene nella natura venga ammesso quel che chiamano *coup de pouce*; cioè che, per arrotondare le cifre, non sia fatto caso dello zero di piú o di meno che possa toccare a qualche stella, divenuta però sproporzionatamente grande o piccola; non è men vero che questi divarî sono piuttosto inconsueti. Certo un errore di due zeri sa dell'inaudito e, di regola, la Natura manifesta una piú sincera fedeltà agli schemi prefissi.

Ma come fa la Natura a tenere il conto degli zeri? Quasi certamente nell'interno della stella esiste

qualchecosa che s'incarica del controllo, dando l'allarme non appena vi si accumula la quantità di materia che giusto occorre. Crediamo anzi di conoscere il segreto di questo meccanismo.

Le onde eteree, le quali circolano all'interno delle stelle cercando di evadere, esercitano sulla materia in cui sono imprigionate una pressione che raggiunge tale intensità da reggere il confronto cogli effetti delle altre forze, e da non doversi mai lasciare da parte nelle indagini concernenti l'equilibrio o la stabilità della stella. Affatto trascurabile in un globo di piccole dimensioni, la medesima pressione aumenta se anche la massa del globo cresce; e, per masse simili a quella solare, il calcolo avverte com'essa pervenga ad un ordine di grandezza pari a quello delle altre forze che governano l'equilibrio della stella.

Se non avessimo mai visto una stella, e solo per curiosità considerassimo il problema inteso a stabilire le dimensioni massime che potrebbe raggiungere un globo di materia, rimanendo tuttavia condensato, riusciremmo a verificare col calcolo che non vi è alcuna difficoltà per raggiungere l'intento, fino a quando la massa si aggira intorno ai duemila quadrilioni di tonnellate, senza superarli. Di là da questo limite, le condizioni mutano profondamente e la nuova forza va acquistando il controllo della situazione. Che cosa avviene, in seguito, della stella? V'è da temere che, a partire dal momento in cui il controllo passa alla nuova forza, il calcolo non proceda piú con rigore; e nessuno, per altro, è riuscito a condurlo innanzi. Ma siccome è difficile ammettere

che solo per mero caso le masse stellari siano tutte molto prossime a questa massa critica, cosí vale la pena di avventurarci a tessere il resto del racconto.

La nuova forza non vieta una massa maggiore, ma la rende certo rischiosa e potrebbe bastare una lieve rotazione del corpo intorno al proprio asse per mandarlo in frantumi. Però sarà rarissimo che resistano masse piú grandi di quella critica: alla massima parte delle stelle corrisponderanno masse inferiori a quella per cui la nuova forza comincia a rappresentare una seria minaccia. La forza di gravitazione mantiene agglomerata la materia nebulosa e caotica, e la ''pressione di radiazione'' la trincia in blocchi di convenienti dimensioni.

Quest'ultima forza è meglio nota col nome di ''pressione della luce'', ma siccome il termine ''radiazione'' comprende tutte le specie di onde eteree, e quindi anche quelle luminose, le due espressioni hanno il medesimo significato[1]. Ora, dapprima teoricamente ed in seguito coll'esperienza, è stato dimostrato che la luce esercita una debole pressione sugli oggetti che ne vengono colpiti; in tal misura che, in teoria, sarebbe possibile rovesciare un uomo dirigendogli contro il cono luminoso d'un proiettore; il quale tuttavia dovrebbe essere molto potente e, prima ancora di riuscire a far cadere il bersaglio, lo volatilizzerebbe.

È molto probabile che la pressione della luce abbia un'importantissima parte in numerosi fenomeni

[1] Taluno dice anche, e non impropriamente: ''pressione dell'energia raggiante'' (*C*).

celesti. Quest'ipotesi deriva non poco dalla scoperta che le minuscole particelle costituenti la coda delle comete sono soggette a ripulsioni prodotte dalla pressione della luce solare; e appunto in tal modo sarebbe forse spiegato perché la coda delle comete si diriga dalla parte opposta a quella del *Sole*. Nell'interno d'una stella, l'intensa corrente di luce (o piuttosto di raggi X) può essere rassomigliata ad un vento che, soffiando con violenza verso l'esterno, gonfia le stelle.

## IMMAGINE DELL'INTERNO D'UNA STELLA

Possiamo ora raffigurarci l'interno d'una stella, questo guazzabuglio d'atomi, di elettroni e di onde eteree. Gli atomi filano alla velocità di centocinquanta chilometri al secondo; la loro consueta acconciatura elettronica, dopo essersi scarmigliata come il crine meduseo, ne viene disvelta nella mischia; e gli elettroni cosí perduti corrono cento volte piú rapidi, finché non trovano dove riposarsi.

Consideriamone uno. Esso, accostandosi ad un nucleo atomico, va quasi ad urtarvi e, come diventa piú veloce, lo sfiora appena, gli gira intorno a tutta velocità seguendo una curva strettissima, superata la quale — ancorché gli avvenga talvolta di slittare — continua la sua marcia, perdendo od acquistando energia. Dopo avere in questo modo rasentato a brevissima distanza un migliaio di nuclei nell'attimo d'un millemilionesimo di secondo, l'elettrone

conclude la sua folle corsa, con uno slittamento piú marcato degli altri, e si lascia ghermire da un atomo che lo incatena a sé. Ma, subito dopo, un raggio X si scaglia sull'atomo e l'elettrone, quando abbia aspirata l'energia della radiazione fino ad esaurirla, balza dal suo effimero asilo verso una nuova e prossima avventura.

C'è da credere che la tormentata tragedia della moderna fisica atomica si voglia tenere lontana dai nostri ideali estetici. Posti innanzi al maestoso dramma dell'evoluzione stellare, ci sembra di assistere ad una vicenda cinematografica, e di poter pensare degli avventurosi protagonisti che, insomma, se la siano saputa cavare per il meglio, immersi nella musica delle sfere celesti che hanno ritmi di *jazz*...

E quali conseguenze da tanto trambusto? Lievi. Gli atomi e gli elettroni, al loro affrettarsi qui o là, non fanno che mutare luogo, senza mai raggiungere un preciso obbiettivo: solo alle onde eteree è dato compiere qualche cosa di permanente e, sebbene paiano lanciarsi a caso verso tutte le direzioni, esse fanno in media qualche progresso verso l'esterno, al contrario degli atomi e degli elettroni sui quali vigila, severa, la gravitazione. Dal suo canto, la prigioniera onda eterea va filtrando lentamente di fuori, come attraverso uno staccio; si precipita da un atomo all'altro, avanti e indietro; e vien qualche volta assorbita, e qualche altra ancora sbalzata su una nuova direzione, perdendo la sua identità per riacquistarla nell'onda che le succede.

È probabile che, dopo un tempo non eccessivamente lungo (fra diecimila e dieci milioni di anni, a

seconda della massa della stella), le onde si accostino alla superficie. Allora, penetrando in regioni a temperatura decrescente, si trasformano, e da raggi X quali erano, diventano raggi di luce, mentre si alterano appena ad ogni rinascita. Giunte vicinissimo alla superficie, possono lanciarsi verso l'esterno e viaggiare quindi in pace, per qualche centinaio d'anni, cosí da raggiungere finalmente un mondo lontano e darsi prigioniere d'un astronomo che, incatenandole al suo telescopio, cerchi di scoprire il mistero del loro luogo d'origine.

A noi in particolare modo occorre individuarne l'efflusso, e per questo dobbiamo dedicarci con pazienza allo studio di quanto avviene in cosí turbolenta calca. Per esprimerci altrimenti, diremo che le onde sarebbero naturalmente sollecitate verso l'esterno dalla proporzionale diminuzione della temperatura stellare dal centro alla superficie; ma ne vengono ostacolate, e risospinte indietro, dalle avventure che esse dividono cogli atomi e gli elettroni. Spetta ai matematici, col sussidio delle leggi e delle teorie che sembrano governare siffatti fenomeni nelle esperienze di laboratorio, il calcolo dei due fattori agenti sull'onda: l'uno per sospingerla verso l'esterno, l'altro per ostacolarla. Seguirà quindi la determinazione della grandezza effettiva dell'efflusso, che deve naturalmente corrispondere alle misurazioni astronomiche del flusso stellare d'energia calorifica e luminosa: non diversamente le teorie vengono saggiate al lume dell'esperienza.

## L'OPACITÀ DELLA MATERIA STELLARE

Consideriamo il fattore pel quale le onde eteree, incontrandosi cogli atomi e con gli elettroni, trovano impedimento al loro flusso e tornano indietro, verso l'interno della stella. A quest'impedimento cui vanno soggetti i raggi X, per analogia a quanto avviene coi raggi luminosi, si dà il nome di ''opacità''.

I raggi contenuti nell'interno d'una stella sono numerosissimi ed affluirebbero senza dubbio in quantità maggiore di quella che osserviamo, se non fossero rigidamente imprigionati nella materia: l'opacità di questa è di conseguenza evidente, e vedremo il valore che le si deve assegnare, tenuto conto dell'efflusso osservato.

Penetriamo ora nell'interno della stella chiamata *Capella*, cercandovi una regione di densità pari a quella dell'atmosfera terrestre[1]: uno strato di materia dello spessore di appena cinque centimetri costituirebbe uno schermo tale che soltanto un terzo della radiazione giungente sopra una faccia potrebbe arrivare alla faccia opposta, mentre i due terzi verrebbero assorbiti dalla materia interposta fra le

---

[1] La densità media di *Capella* ha all'incirca il valore della densità dell'aria. *Capella*, o *Capra*, appartiene alla costellazione del *Cocchiere*: la densità dell'aria, rispetto alla densità dell'acqua distillata alla temperatura di 4 gradi centigradi, è di 0.001293 (*C*).

due facce. Se lo spessore raggiungesse i tre o sei decimetri, lo schermo sarebbe perfetto, le onde eteree giungenti sopra una faccia verrebbero assorbite per intero. Ottenere questo grado di opacità rispetto ai raggi luminosi, in una materia tenuissima com'è l'aria, sarebbe cosa davvero sorprendente. Ma non bisogna dimenticare qual è la radiazione di cui trattiamo: invero i fisici sperimentali hanno oramai fatta l'abitudine alle difficoltà che si oppongono al passaggio dei raggi X piú molli attraverso uno strato d'aria di qualche millimetro.

Siccome l'ordine di grandezza accertato per l'opacità dell'interno d'una stella, quale annunziano le osservazioni astronomiche sul flusso della radiazione, è in buon accordo con quello assegnabile all'opacità che presentano le sostanze terrestri in rapporto ai raggi X di lunghezza d'onda analoga, la nostra teoria appare ben fondata. Ma un confronto piú meticoloso ci rivela, fra l'opacità stellare e quella terrestre, differenze non certo trascurabili.

Nelle ricerche di laboratorio troviamo che l'opacità cresce molto rapidamente insieme con la lunghezza d'onda dei raggi X impiegati; ciò invece non appare nelle stelle, ancorché i raggi X esistenti in quelle piú fredde abbiano lunghezze d'onda considerevolmente maggiori dei raggi X delle stelle piú calde. Se tuttavia il confronto cade fra lunghezze d'onda identiche, l'opacità stellare si manifesta inferiore a quella terrestre.

Per approfondire questo punto, cominceremo a dire che i modi coi quali un atomo può intercettare le onde eteree sono varî, sebbene sembri fuori dub-

bio che, riguardo ai raggi X stellari come anche a quelli prodotti nei laboratori, il piú dell'opacità dipenda dal processo secondo cui avviene la ionizzazione. Quando l'onda eterea s'imbatte in un atomo, la sua energia vien tutta aspirata da un elettrone planetario, che la impiega per liberarsi dall'atomo medesimo ed evaderne poi ad alta velocità (Pag. 27). Ora è da rilevare che, all'atto medesimo dell'assorbimento, il meccanismo assorbente si frantuma; né serve piú fino a quando non venga riparato di nuovo; finché, cioè, non catturi un elettrone errante alla ventura, costringendolo a prendere il posto dell'elettrone perduto.

Le correnti di raggi X che solo possiamo produrre nei laboratori sono piuttosto povere, e però ogni ''trappola d'onde'' non viene chiamata ad agire se non accidentalmente. Prima che al suo predare si offra una nuova occasione, essa ha tutto il tempo occorrente per raggiustarsi ed in pratica, durante il tempo impiegato al suo ripristino, non perde efficienza; in altre parole, non si può dire che questo tempo vada considerato perduto per la bisogna. Nelle stelle, invece, la corrente di raggi X è quanto mai intensa, e la possiamo rassomigliare ad un esercito di topi che, invadendo la nostra stanza, riuscisse a far scattare tutte le trappole dispostevi, man mano che le avessimo armate. Quel che conta è il tempo speso a tendere di nuovo le trappole, e quindi a catturare gli elettroni, se il numero delle catture dipende quasi esclusivamente dal tempo medesimo.

Si è già visto come gli atomi stellari abbiano perduto gran parte dei loro elettroni; ciò equivale ad

affermare che v'è ogni istante una forte percentuale di trappole d'assorbimento in attesa di venire raggiustate. Quest'è appunto il motivo per cui l'opacità stellare è inferiore a quella delle sostanze terrestri: l'indebolimento dell'opacità non è se non una conseguenza dell'eccessivo lavoro al quale sono sottoposti i meccanismi di assorbimento per effetto del ragguardevole irraggiamento. Possiamo anche spiegarci come avvenga che le leggi dell'opacità stellare e quelle dell'opacità terrestre siano alquanto diverse. La velocità di riparazione — che qui è quanto importa di piú — aumenta se la materia viene compressa; allora l'atomo deve infatti aspettare di meno per incontrare e catturare un elettrone libero. Di conseguenza l'opacità aumenta nelle stelle colla densità, e ne è invece indipendente nella materia terrestre, dove non si ricava alcun vantaggio accelerando la riparazione; la quale richiederà sempre un tempo abbastanza breve.

La teoria dell'opacità stellare viene cosí ridotta sostanzialmente alla teoria della cattura degli elettroni mediante atomi ionizzati, cioè del fenomeno che — sebbene non si accompagni ad un assorbimento di raggi X, essendo di fatto accompagnato da una emissione — crea la condizione preliminare dell'assorbimento. Non ancora definitiva, questa teoria è tuttavia abbastanza progredita. E la possiamo utilizzare provvisoriamente nei calcoli del fattore che si oppone al flusso della radiazione stellare.

## RELAZIONE FRA LO SPLENDORE E LA MASSA

Per evitare di trovarci subito di fronte ad un problema molto complesso, ammetteremo che le stelle siano costituite da un gas perfetto. Se non piacerà l'espressione troppo tecnica di "gas perfetto"[1] diremo senz'altro "gas", giacché tutti i gas terrestri piú noti, quando non siano sottoposti ad alte pressioni, sono da considerare praticamente perfetti; qui ed altrove col termine "gassoso" ci riferiremo, in ogni modo, ai gas perfetti.

Gli esempi di stelle costituite da gas perfetti sono numerosissimi. In molte di esse la materia è tanto dilatata da apparire piú tenue dell'aria che ci circonda: trovandoci, poniamo, nell'interno di *Capella,* non riusciremmo ad avvertire la presenza della materia intorno, meglio di quanto ci avvenga dell'aria diffusa in questa stanza.

Nota la massa, la teoria ci dà il mezzo di calcolare colle sue formule l'energia calorifica e luminosa che le stelle gassose emettono; in altre parole, il loro splendore. La curva disegnata nella figura 13 ci fornisce appunto la relazione corrente in teoria fra lo splendore e la massa d'una stella. A rigore, sullo

---

[1] Ricordiamo che un gas si dice perfetto, o "ideale", quando soddisfa rigorosamente all'equazione fondamentale $p \cdot v = R.T$, secondo cui il prodotto della pressione pel volume è uguale ad una costante moltiplicata per la temperatura assoluta ($C$).

splendore calcolato, in piú della massa influisce anche un altro fattore: la densità; ed invero ci possono essere due stelle che, possedendo l'identica massa, abbiano diverso splendore, per effetto del differente volume. Tuttavia, all'opposto di quanto potrebbe credersi, la densità modifica di poco lo splendore, a meno che la materia di cui è costituita la stella non sia troppo densa, e non possa quindi comportarsi come un gas perfetto. Cosí qui non occorre tener conto della densità.

Esaminiamo da vicino l'andamento della curva. Lo splendore vien misurato in ''grandezze'' e, via via che cresce il valore espresso in tale unità [1], tanto piú diventa scarso il numero delle stelle che gli si può far corrispondere. Il diagramma concerne in pratica la totalità degli splendori stellari: al numero −4 corrispondono a un di presso le piú splendenti stelle conosciute; al numero 12, invece, quelle che si trovano al limite inferiore degli splendori; la differenza tra i due estremi è all'incirca la medesima di un arco voltaico da una lucciola e, per citare un termine intermedio, ricorderemo che il *Sole* ha approssimativamente la grandezza 5. Devesi notare che queste grandezze sono riferite allo splendore effettivo e non allo splendore apparente, sul quale influisce anche la distanza; ed altresí che il diagramma considera lo ''splendore calorifico'', un

[1] Lo splendore apparente di una stella di seconda grandezza è all'incirca 2.5 volte inferiore a quello di una stella di prima grandezza, scelta appunto come unità (*C*).

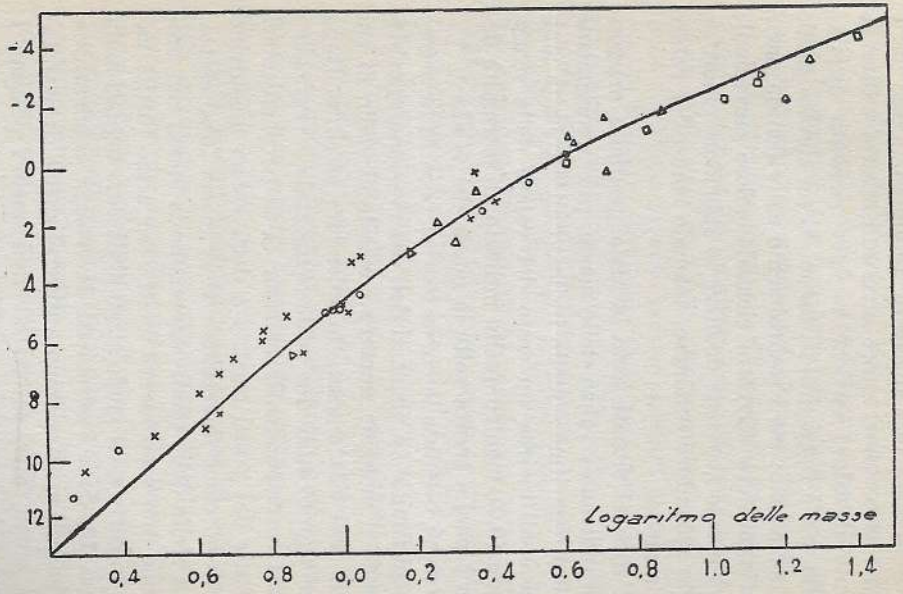



Fig. 13. — Grafico della relazione fra lo splendore (grandezze assolute) e il logaritmo delle masse: i cerchietti indicano le stelle della prima classe ricordata nel testo, le croci quelle della seconda, i quadratini le *Cefeidi*, i triangoli le variabili ad ecclisse.

poco diverso dall'intensità luminosa. Cogli strumenti astronomici riesce invero di misurare direttamente il calore anziché la luce ricevuta da una stella, e s'è raggiunto in tal modo un elevato grado di perfezione; ma l'assorbimento calorifico da parte dell'atmosfera terrestre richiede noiose correzioni: però spesso conviene dedurre lo splendore calorifico dallo splendore luminoso, tenendo conto del calore della stella.

I numeri situati sotto la scala graduata orizzontale indicano i valori delle masse, piú precisamente il loro logaritmo: quello indicato all'estremità sinistra è all'incirca un sesto del valore della massa solare (0.0), mentre quello indicato all'estremità destra è pari a trenta volte la massa del *Sole*.

Poiché, ottenuta la curva teorica, occorre provarne la legittimità coi risultati dell'osservazione, considereremo il maggior numero possibile di stelle di cui siano noti e la massa e lo splendore assoluto. Dopo aver seguíto sulle due scale orizzontale e verticale i valori corrispondenti, vedremo se le perpendicolari inalzate dai punti relativi a detti valori incontrino la curva, come dovrebbero se la teoria fosse esatta.

Le stelle delle quali conosciamo la massa con precisione non sono invero molte; per altro tutti i valori in certo qual modo attendibili sono segnati sulla figura 13, dove i cerchietti, le croci, i quadratini e i triangoli si riferiscono a diverse specie di dati, taluni buoni, altri cattivi ed altri ancora pessimi. I valori piú sicuri sono quelli indicati coi cerchietti, e li andremo seguendo da destra verso sinistra. Vien dapprima la componente brillante di *Capella*

la quale si trova ottimamente a posto sulla curva, fatta passare di proposito per il punto che corrisponde a questa stella. Introduciamo cosí una costante numerica, ché la sola teoria, alla stregua delle nostre attuali conoscenze sugli atomi, le onde eteree, ecc., non avrebbe permesso di determinare un'incognita se non molto incertamente. In mancanza di questa costante, la curva, pur mantenendosi nella stessa direzione, avrebbe potuto spostarsi verso l'alto o verso il basso, ed invece l'abbiamo ancorata alla componente brillante di *Capella,* che è apparsa la stella piú adatta; di conseguenza, la curva non abbisogna d'altri ritocchi. Continuando verso sinistra troviamo l'altra debole componente di *Capella,* poi *Sirio* e quindi ancora, a grappolo, le due componenti dell'*Alfa del Centauro* (la stella fissa piú prossima alla *Terra*) e in mezzo il *Sole;* troviamo, sulla curva, un cerchietto che indica la media di sei stelle doppie del gruppo delle *Iadi* e infine, distante verso sinistra, le due componenti di una stella doppia ben nota: la *Krueger 60*[1].

I dati forniti dall'osservazione per il controllo della curva non sono né numerosi né sicuri quanto desidereremmo, ma alla stregua della figura 13 la teoria appare sostanzialmente confermata, offrendo la possibilità di predire lo splendore d'una stella, ove se ne conosca la massa, e viceversa. Utile risultato, giacché di migliaia di stelle conosciamo, per

[1] La doppia *Krueger 60* è compresa nella costellazione boreale della *Lucertola* (*C*).

misure dirette, lo splendore assoluto e non la massa. La quale può ora venir dedotta dalla teoria con un certo grado di esattezza.

Non potendo qui dare i particolari del calcolo, è necessario chiarire che la curva della figura 13 è stata tracciata sulla base della pura teoria o di esperimenti terrestri; eccetto la costante, come dicevamo, che risulta dal far passare la curva pei valori di *Capella*.

Immaginiamo dei fisici al lavoro in un pianeta avvolto da nubi, poniamo *Giove*. Se essi non avessero mai veduto una stella, seguendo il metodo esposto a pagina 24, potrebbero asserire che, esistendo un universo di là dalle nubi, l'universo medesimo si è in origine raccolto in masse distinte, dell'ordine dei mille quadrilioni di tonnellate, per formarne globi emettenti luce ed energia calorifica; e che lo splendore di questi dipende dalla massa al modo indicato dalla figura 13. I fisici del massimo pianeta, anche sotto il velo delle nubi, potrebbero utilizzare le medesime cognizioni che hanno soccorso i nostri calcoli e, pur non servendosi della componente brillante di *Capella*, trarrebbero dalle teorie fisiche attuali la capacità di assegnare all'invisibile folla stellare splendori non certo assurdi. Tutt'al piú, e se non fossero meglio accorti di noi, potrebbero forse attribuire a tutte le stelle uno splendore dieci volte maggiore[1]: errore non grossolano, trattandosi del

[1]) Non occorre conoscere, a questo scopo, la composizione chimica delle stelle, e basta escludere i casi estremi, quale sarebbe un'eccessiva proporzione di idrogeno rispetto agli

primo tentativo di soluzione d'un problema di natura trascendentale.

Allorché conosceremo piú profondamente i fenomeni atomici, sarà chiarito il valore di questo fattore; ma intanto lo scartiamo, accontentandoci di fissare l'incerta costante col sussidio dell'osservazione astronomica.

## STELLE DENSE

L'accordo fra i punti indicati dall'osservazione e i punti teorici della curva è buono; e costituisce, dato il carattere grossolano delle misure, una conferma abbastanza soddisfacente della teoria. Ma qui dobbiamo fare una confessione piuttosto sconcertante: il collaudo della teoria è avvenuto

---

altri elementi. Consideriamo, a mo' di esempio, l'ipotesi che *Capella* sia costituita *o* di ferro *o* di oro. Secondo la teoria, l'opacità d'una stella composta dell'elemento piú pesante sarebbe equivalente a due volte e mezzo l'opacità della stella di massa identica, costituita di ferro. Per questo fatto, alla grandezza della stella d'oro andrebbe attribuito un valore due volte e mezzo piú piccolo. Per effetto della sostituzione, la temperatura salirebbe: la variazione, come abbiamo spiegato alle pagg. 20-2, non è molto rilevante, ma il flusso calorifico verso l'esterno di conseguenza crescerebbe all'incirca nel rapporto di uno a due e mezzo, sicché l'effetto risultante sullo splendore sarebbe praticamente nullo. Se è vero che l'indipendenza dalla costituzione chimica soddisfa, siccome conduce a chiari risultati, non è men vero che essa rende particolarmente difficile l'interpretazione del fattore discordante 10.

colle stelle peggiori o, per lo meno, con quelle che cosí dovevano apparire quando, ai primi del 1924, ebbero inizio questi confronti di prova.

È bensí necessario ricordare che la teoria fu istituita per le stelle che si trovavano nelle condizioni dei gas perfetti. Nella metà destra della figura 13, le stelle rappresentate son tutte stelle diffuse; fra le quali *Capella* — la cui densità media (Pag. 29) è quasi uguale a quella dell'aria contenuta in questa stanza — può essere citata come un esempio tipico. Non v'ha dubbio che sí tenue materia sia un vero gas, e appunto vien confermata la teoria giacché le caratteristiche di queste stelle sono conformi alla curva.

Nell'altra metà del diagramma troviamo invece il *Sole*, la cui materia è piú densa dell'acqua, la *Krueger 60* piú densa del ferro, e molte altre di densità proprie della materia allo stato solido o liquido.

Cosa dunque ci stanno a fare queste stelle sulla curva riservata al gas perfetto? Quando le medesime stelle vennero segnate sul diagramma, non era davvero atteso che s'accordassero colla curva; ed anzi questo accordo infastidí. Allora si cercava ben altro, pensando che la teoria medesima, già confermata in rapporto alle stelle diffuse, potesse trovar credito per i suoi meriti intrinseci. Cosí, misurando la distanza alla quale dovevano trovarsi sotto la curva le stelle dense, si sperava di raccogliere precisi ragguali sul valore dello scarto dalla legge dei gas perfetti per una data densità. E si supponeva che il *Sole* e la *Krueger 60* — in armonia

colle idee correnti — dovessero trovare il loro posto sotto la curva, in modo da distarne rispettivamente: il primo per tre o quattro grandezze, e l'altra — certo piú densa — per dieci[1].

Sappiamo già che quest'attesa è andata delusa, e non sapremmo dire quanto, dato il domma, posto a fondamento delle nostre concezioni sull'evoluzione stellare, che lo splendore delle stelle troppo dense per potersi comportare come un vero gas deve subire una forte contrazione. E proprio sotto l'influenza di questo domma avevano distinto le stelle in due gruppi: stelle ''giganti'' quelle gassose, ''nane'' quelle dense.

Ora ci troviamo di fronte a due eventualità.

La prima, che nella nostra teoria sia andato ad insinuarsi qualche errore e, di conseguenza, che la vera curva per le stelle gassose non sia quale noi abbiamo tracciato; ma che invece la si debba spostare nella parte sinistra verso l'alto, in tale misura che il *Sole*, *Krueger 60*, ecc., vengano a distarne quant'occorre. Il critico immaginario (Pag. 17) sarebbe però nel giusto: nascondendo nelle stelle qual-

---

[1] Siccome l'osservazione rivelava che il *Sole* è inferiore press'a poco di quattro grandezze alla stella diffusa media della medesima classe spettrale, e analogamente la *Krueger 60* di dieci grandezze, di regola se ne attribuiva la causa a nient'altro che allo scarto delle medesime stelle dalla legge dei gas perfetti, senza tenere in alcun conto l'eventualità di una differenza di massa. Ma confrontando per mezzo della curva una stella densa colla stella gassosa di pari massa, ogni differenza svanisce; però — salvo errore — la stella densa deve essere una stella gassosa, e le dette differenze vanno fatte dipendere esclusivamente da differenze di massa.

cosa di inatteso, la natura scombussolerebbe i nostri calcoli. Se cosí fosse, pel fatto di giungere a stabilirlo, alla nostra indagine non mancherebbe tuttavia il merito d'essere utile.

Per l'altra eventualità bisogna domandarsi se sia davvero impossibile un gas perfetto il quale abbia la densità del ferro. Non v'è — la risposta forse sorprende — alcuna ragione terrestre per escludere che un gas perfetto abbia una densità anche molto maggiore di quella del ferro. O meglio, questa impossibilità esiste, ma ha fondamento di ragioni terrestri, non invocabili per le stelle.

Potrà apparire incredibile; ma la materia solare, sebbene piú densa dell'acqua, è un gas perfetto. Infatti, è proprietà caratteristica dei gas perfetti, d'avere le particelle enormemente distanziate: poca sostanza e molti spazî vuoti. Di conseguenza, comprimendo un gas non se ne comprime la sostanza: si elimina dello spazio vuoto. Questo, ad un certo momento, se la compressione continua, vien soppresso per intero: gli atomi giungono a reciproco contatto, ed ogni successiva compressione vale quanto comprimere la sostanza medesima; ciò che è affatto diverso. In pari tempo, e quando questa densità sta per essere raggiunta, la comprimibilità caratteristica del gas va perdendosi: la materia non è piú un gas come dobbiamo intendere propriamente. I liquidi, nei quali gli atomi sono press'a poco a contatto, suggeriscono l'idea che occorre farsi della densità a cui i gas perdono la loro peculiare proprietà: d'essere comprimibili.

Nelle stelle non esistono atomi, come quelli ter-

restri, che giungano a schiacciarsi vicendevolmente alla densità approssimativa dello stato liquido. Gli atomi stellari, in seguito all'asportazione dei loro elettroni esterni, restano spogli, qual piú e qual meno: per intero gli atomi piú leggeri che, ridotti al nucleo, assumono dimensioni davvero minime, mentre quelli pesanti, conservando alcuni degli elettroni piú interni, giungono ad un diametro che supera di poco il centesimo del diametro dell'atomo integro. La compressione può quindi continuare e non per ciò i minuscoli atomi, divenuti ioni, arrivano a toccarsi. Alla densità dell'acqua, o magari del platino, fra gli atomi spogli permane tuttavia dello spazio che, come in un gas perfetto, può essere diminuito colla compressione.

Ora comprendiamo il nostro errore: valutando il grado di congestione della sala da ballo stellare, dimenticavamo che le crinoline non sono piú di moda. Siamo stati davvero ciechi a non prevedere questo risultato, pur avendo rivolto la nostra attenzione alla mutilazione atomica in altre parti della nostra ricerca. Non importa; sebbene dopo un giro vizioso siamo giunti ad una conclusione veramente chiara: che, cioè, le stelle sulla sinistra del diagramma non sono, alla fin dei conti, stelle cattive: il *Sole* e le altre stelle dense sono sulla curva dei gas perfetti perché la loro sostanza è un gas perfetto. Accurate indagini hanno dimostrato che, nelle stelline all'estrema destra della figura 13, le cariche elettriche degli atomi e degli elettroni provocano un lieve scarto dalle leggi ordinarie d'un gas, rendendo il gas, non già imperfetto, ma ultraperfetto,

sí da farlo diventare piú facilmente comprimibile d'un gas ordinario, come ha dimostrato R. H. FOWLER.

Si nota infatti che le stelle situate a sinistra della figura 13 si collocano un poco sopra la curva. Probabilmente questo scarto è reale, e deriva in parte dal fatto che il gas è ultraperfetto: abbiamo visto già che l'imperfezione le avrebbe portate sotto la curva.

Poiché l'estensione dello spazio vuoto è molto grande anche nei corpi i quali abbiano la densità del platino, la materia stellare può essere compressa fino ad una densità molto maggiore di quelle note sul nostro pianeta. Ma quest'è un'altra storia, che racconteremo in seguito.

## CONCLUSIONE

L'accordo generale fra gli splendori osservati e quelli previsti per stelle di varia massa è la prova migliore dell'esattezza delle nostre teorie sulla costituzione interna delle stelle. E del pari costituisce un'importante conferma il fatto che tutte le masse stellari possano essere ordinate in una serie che dipende singolarmente dalla pressione della luce.

Ciò nonostante esagereremmo, se credessimo che questi felici ma ristretti risultati ci abbiano fatto conquistare la vera conoscenza dell'interno delle stelle. Essi vanno considerati solo come un incoraggiamento a continuare le ricerche nella direzione seguíta finora; e, paghi gli ottimisti dei risultati otte-

nuti, le menti piú circospette si prepareranno a nuove difficoltà. Dà tuttavia motivo a pensare di non trovarci molto lontani dal vero la considerazione che nell'interno d'una stella, meglio di altrove, il problema della materia è ridotto alla massima semplicità; è però che l'astronomo deve affrontare un problema con mire sostanzialmente meno presuntuose di quelle propostesi dal fisico, cui la materia appare sempre sotto forma di sistemi elettronici di struttura complicatissima.

Invocando ed applicando le teorie odierne della fisica, le abbiamo costrette a conclusioni estreme, non per vaghezza dommatica, ma perché quest'è il modo migliore per saggiarle e scoprirvi le eventuali deficienze.

Ai tempi che furono, due aviatori si provvidero d'ali. Dedalo volò sicuro ad un'altezza media e, quando toccò di nuovo terra, ebbe lodi ed onori. Icaro salí piú alto e si avvicinò a Febo; ma, fusa la cera che gli teneva legate le ali, precipitò in mare.

Valutando a modo le due imprese, qualche cosa muove a simpatia per Icaro anche l'uomo di scienza. Sebbene i classici narrino che il figliuol di Dedalo si preoccupò fuori misura degli spettatori di facile gusto, noi preferiamo considerare ch'egli riuscí a rendere palese un grave difetto delle macchine volanti del suo tempo. Cosí nella scienza. Il prudente Dedalo, applicando le sue teorie là dove ha certezza di non incontrare pericoli, non riuscirà a scoprire, a causa della smisurata sua prudenza, gli ignoti difetti delle teorie medesime. Icaro, invece, sfrutterà le proprie sino al punto di rottura: finché

cedono i deboli giunti. Amore d'avventura? In parte può anche darsi, com'è nella natura umana. Ma se il suo destino vuole ch'egli non raggiunga l'astro, per risolvere finalmente l'enimma della costituzione solare, possiamo almeno nutrire la speranza di trarre consiglio dal suo viaggio per costruire una macchina migliore.

## II

# ATOMI LONTANI E NUOVE STORIE DI ASTRI

Rapporti dimensionali fra le componenti di *Algol* – La densità della compagna di *Sirio* – Spostamento einsteiniano delle righe spettrali – Le righe caratteristiche degli elementi – Il nebulio – La composizione chimica degli astri – Le serie di BALMER e di PICKERING – Elio ionizzato e idrogeno – Sodio e calcio nello spazio intersiderale – Atomi galleggianti sui raggi solari – Il peso della cromosfera solare – Misure interferenziali – Caratteristiche della stella *Betelgeuse* – Fisica terrestre ed astrofisica.

Per valutare meglio l'importanza astronomica delle cose dette nella prima conferenza, vedremo come riesca di applicarle — passando dal generale al particolare — a determinate stelle; piú precisamente a due, delle quali novelleremo, narrando in qual modo siamo riusciti a raccogliere ciò che ne sappiamo.

### LA NOVELLA DI ALGOL

È una novella poliziesca, quale ora usa, col titolo: ''La parola perduta e la falsa traccia''.

All'astronomia non è consentito, come invece a molte altre scienze, né maneggiare materialmente né

sperimentare sugli oggetti delle sue indagini. Passivi e vigilanti, noi dobbiamo attendere i messaggi recati dai raggi di luce emessi dalle stelle, unica loro voce, e, quando i nostri strumenti li hanno ricevuti, cercare di capirli.

Vi sono alcune stelle che per l'appunto sembrano inviarci una serie regolare di punti e linee, al modo dei fari di luce intermittente. Saremmo ben fortunati se riuscissimo a tradurli, come i telegrammi, coll'alfabeto MORSE; ma, se questo è impossibile, non ci diamo per vinti: sappiamo interpretare i messaggi stellari in altra guisa, e riconoscerne la fervida eloquenza.

*Algol* è la piú famosa di codeste "stelle variabili", ed i suoi segnali annunziano che in verità si tratta di due stelle rivoluenti[1] l'una intorno all'altra. Qualche volta si nasconde la piú luminosa, dando luogo ad un notevole ecclissi, e riceviamo allora una linea; quando si nasconde l'altra, riceviamo un punto, che si ripete ad intervallo di due giorni e ventun ora, quanto dura il periodo di rivoluzione delle due stelle.

Il messaggio conteneva molte altre notizie, ma appariva enimmatico e torturante a causa d'una parola, diremo cosí, perduta; e non avremmo potuto leggerlo difilato se non ritrovando questa parola. Allora soltanto, non avremmo cercato inutilmente precisi ragguagli sulle dimensioni del sistema, cioè

---

[1] "Rivoluire" non è, coi derivati, nell'uso comune; ma esprime con semplicità l'atto dei corpi celesti che compiono "moti di rivoluzione" (*C*).

sui diametri e le masse delle componenti, e sullo splendore assoluto, e la distanza reciproca e quella di entrambe dal *Sole*. Nulla di determinato intorno a tutto ciò avrebbe invece detto il messaggio, ripetiamo, finché la parola non si fosse fatta viva a permetterci di sciogliere l'enimma. E che uomini sarebbero mai stati gli astronomi, se non avessero cercato di indovinarla? Questa parola avrebbe consentito, in particolare, di stabilire il rapporto corrente fra la massa della stella piú brillante e la massa dell'altra.

Alcune stelle variabili meno note, e rappresentate nei triangoli della fig. 13, ci inviano messaggi completi, dei quali ci siamo serviti per mettere alla prova la relazione fra la massa e lo splendore assoluto (Pagg. 33-9). *Algol,* ripetiamo, no. E dell'incompiutezza dei suoi messaggi era colpevole la componente piú brillante che, sommergendoli nel suo enorme splendore, rendeva affatto inintelligibili i tenui segnali della componente piú debole.

Potendo rilevare da altri sistemi di stelle doppie il valore piú comune del rapporto fra le due masse, disponevamo tuttavia d'un elemento di paragone, che ci avrebbe dato una qualche idea del probabile valore da far corrispondere alle due stelle di *Algol*. Benché autorevoli studiosi preferissero risultati un poco differenti, era opinione generale che, nei sistemi simili a quello di *Algol,* la massa della componente piú brillante fosse doppia dell'altra. La parola perduta del messaggio di *Algol* poteva essere quindi il numero due; e con questa ipotesi, ventun anno or sono — stime meno certe sono di epoca piú lon-

tana —, venivano calcolate le varie dimensioni del sistema, ottenendo valori che generalmente reputavansi molto prossimi alla realtà.

Leggiamo il messaggio ricostruito in virtú di questo numero: il raggio della stella piú brillante è pari ad un milione e centomila chilometri (una volta e mezzo il raggio del *Sole*); la sua massa è la metà di quella solare; il suo splendore assoluto trenta volte quello dell'« astro maggior de la natura »; ecc., ecc..

Si vede subito che siffatte proprietà non si adattavano alla curva della fig. 13 giacché una stella di massa pari alla metà della massa del *Sole* deve anche splendere molto meno di questo; e non era davvero cosa da poco, che alla teoria si ribellasse proprio una stella tanto rinomata quale *Algol*. Ma, alla fin dei conti, le teorie vanno provate coi fatti e non colle supposizioni; e si poteva credere che, per quella cui ci riferiamo, riuscisse di trovare una base piú solida dell'ipotetica interpretazione della parola perduta: tanto piú che, non convenendosi di regola al tipo spettrale di *Algol* masse cosí piccole, era lecito dubitare della bontà dei valori precedenti.

Se la teoria esposta nella prima conferenza merita la nostra fiducia occorre prescindere dalla parola perduta. O, detto altrimenti, anziché ammettere di poterla senz'altro sostituire col numero due, dobbiamo fare tentativi coi numeri successivi, finché, interpretando il messaggio, non riesca di trovarvi l'indicazione di valori, della massa e dello splendore della componente piú brillante, che convengano alla curva della fig. 13. Col numero due, come abbiamo già veduto, giungiamo ad un punto molto

distante dalla curva; col numero tre — calcolando di nuovo la massa e lo splendore secondo quest'ipotesi — ad un punto un poco piú prossimo. Continuiamo coi numeri seguenti, quattro, cinque, ecc.: se il punto attraversa la curva, vuol dire che ci siamo spinti troppo lontano, e bisogna allora prendere un valore intermedio, in modo da raggiungere l'accordo desiderato.

Questo si è appunto avuto nel novembre 1925, sostituendo al numero due — è facile immaginare con quanto stupore, date le conseguenze che ne derivavano — il numero cinque. Però possiamo leggere nel messaggio di *Algol* che la componente piú brillante ha il raggio di due milioni e centoquarantamila chilometri, e che la sua massa è pari al quadruplo e tre decimi della massa solare. Di conseguenza, con un divario certo notevole rispetto ai valori numerici primitivi, viene attribuita a questa componente una massa maggiore, che la fa appartenere piú probabilmente al tipo *B* della classificazione H. Draper introdotta dall'Osservatorio Harvard, ed ora comunemente usata invece di quella piú sommaria del P. Secchi. Dal calcolo deriva altresí che *Algol* ha uno splendore cento volte maggiore del *Sole* e la parallasse [1] di 0″.028, corrispondente al doppio della distanza prima ammessa.

Al tempo che furono raccolti questi risultati, si temeva di non poterli saggiare coll'osservazione: si

---

[1] Diremo, per i lettori meno informati, come ciò corrisponda ad affermare che la distanza Terra-Sole sarebbe vista da *Algol* sotto l'angolo di ventotto millesimi di secondo (*C*).

sperava di farlo tutt'al piú, e mediante misure trigonometriche, per la parallasse; ma questa è tanto esigua da sfuggire quasi alle misure di sensibile precisione. Occorreva, per ciò, assumere l'atteggiamento del ''prendere o lasciare'': o accettare la teoria, e riconoscere che *Algol* doveva essere quale suggeriva la teoria medesima, o negarla senza nemmeno considerare i risultati ottenuti.

Due astronomi, nell'Osservatorio Ann Arbor dello Stato di Michigan, e con un nuovo ed interessante metodo, s'erano dati frattanto a cercare la parola perduta. Erano anzi riusciti a trovarla, e la pubblicavano un anno prima; ma mancò ai loro lavori un'adeguata diffusione.

Quando una stella ruota intorno al proprio asse, un suo orlo o ''lembo'' si allontana da noi e l'altro se ne avvicina. La velocità di avvicinamento e quella di allontanamento possono essere determinate, in chilometri al secondo, mediante l'effetto spettroscopico DOPPLER; cosí, osservando dapprima l'orlo orientale e poi quello occidentale del *Sole*, e facendo quindi la differenza delle due velocità osservate, è possibile misurare, come infatti misurano, la velocità di rotazione equatoriale dell'astro (Pag. 80).

Tutto ciò soccorre per il meglio le nostre indagini a riguardo del *Sole*, sul disco del quale possiamo scegliere quelle parti che vogliamo osservare; ma come vi riusciremmo volendo riferirci ad una stella appena visibile come un punto luminoso? Invero noi direttamente non lo potremmo, e vi provvede in nostra vece la medesima *Algol*, la cui componente debole serve essa medesima da scher-

mo. Infatti, passando innanzi all'altra componente, un istante ne scopre una piccola porzione ad est, mentre un altro istante scopre una porzione simile ad ovest. Com'è naturale, data l'enorme distanza dai nostri Osservatori, non si riesce a cogliere l'esatta forma di queste ''falci'' di *Algol*; ma poiché in quegli istanti ci giunge la sola luce emessa da queste porzioni, mentre il resto del disco rimane nascosto, allora tutto avviene come si trattasse d'uno schermo regolato colle nostre mani. Per fortuna, la velocità di rotazione di *Algol* è tanto alta che possiamo misurarla con un errore relativamente piccolo. Moltiplicando la velocità equatoriale cosí dedotta pel periodo di rotazione[1], si ottiene la circonferenza di *Algol*; e dividendo questo valore pel doppio del ben noto numero fisso 3.14, il quoziente corrisponde al raggio dell'astro.

Tale appunto il metodo adottato dal Rossiter e da McLaughlin che, applicandolo ad *Algol*, determinava il raggio della componente brillante in due milioni e centottantamila chilometri. Il risultato, alla stregua dei nostri elementi di giudizio, è esattissimo; anzi va detto che il medesimo raggio è noto meglio di tutti gli altri raggi stellari, meno quello solare. Inoltre, questo valore è molto pros-

[1] Il periodo di *Algol* da noi osservato è quello di rivoluzione e non di rotazione. Ma le componenti del sistema sono vicinissime l'una all'altra e, per effetto delle intense forze di marea, dovute alla loro reciproca attrazione, certo le due facce si trovano sempre rivolte l'una verso l'altra; cioè: il periodo di rotazione e quello di rivoluzione hanno uguale durata.

simo a quello indicato dalla teoria (Pag. 51), e bisogna aggiungere che le altre costanti e dimensioni del sistema, secondo i calcoli di McLaughlin, sono apparse anch'esse in buon accordo colla teoria, giacché al messaggio non mancava se non una parola, riconosciuta nel numero cinque, esatto senza decimali, tanto dall'una che dall'altra determinazione.

Ma la novella non è ancora giunta alla fine. Come mai la prima ipotesi sul rapporto delle masse conduceva ad un sí grave errore? Adesso ci è dato capire perché alle differenti masse debbano corrispondere, di necessità, differenti splendori. La differenza di questi era pur dichiarata dal primitivo messaggio di *Algol,* il quale indicava come lo splendore della componente piú debole dovesse essere all'incirca tredici volte inferiore a quello dell'altra (o almeno cosí interpretavamo). Secondo la curva della figura 13, ciò significava ammettere fra le due masse un rapporto pari a quello di due e mezzo ad uno, che non è certo molto piú approssimato del rapporto di due ad uno, suggerito dalla nostra prima ipotesi. Col rapporto di cinque ad uno, lo splendore della compagna avrebbe dovuto essere a tal punto piú debole da non lasciarsi neppure discernere. Considerazioni di questo genere non potevano certo avere una soverchia influenza sulla primitiva supposizione, ma questa sembrò appunto trovare conforto in virtú loro, e non sarebbe poi stata illegittima fino all'inverosimile.

Chiamiamo *Algol A* la componente piú brillante di *Algol,* e *Algol B* l'altra. Qualche anno fa veniva scoperta anche un'altra componente:

*Algol C*. Infatti era apparso che *Algol A* ed *Algol B*, descrivendo un'orbita del periodo di quasi due anni, rivoluivano intorno ad una terza stella; o, per essere piú esatti, rivelato un moto di rivoluzione di questo periodo, bisognava ammettere l'esistenza di un qualche corpo intorno a cui si svolgesse il moto. Prima di questa scoperta si credeva che, nella fase piú oscura dell'ecclissi, allorquando *Algol A* era nascosta quasi per intero, tutto il resto della luce provenisse da *Algol B*. Proviene invece, come ora è chiaro, da *Algol C* la quale risplende di continuo senza interferenze. Per effetto di ciò, il rapporto di due e mezzo ad uno va riferito ad *Algol A* ed *Algol C*, mentre la luce proveniente da *Algol B* è inapprezzabile, qual si conviene al rapporto fra le masse di cinque a uno [1].

Il messaggio di *Algol* ci appariva confuso, non solo perché se n'era perduta una parola, ma anche perché vi si erano intromesse una o due parole d'un altro messaggio, inviato da *Algol C*. Proprio per ciò, essendosi pur scoperto in due modi che la parola mancante doveva essere il numero cinque, il messaggio non perdeva tuttavia certa sua incoerenza, ed infatti zoppicava altrove, indicando il numero due e mezzo. Ma, nell'ultima fase di queste ri-

---

[1] Gioverà aggiungere che, pur non essendo apprezzabile la luce di *Algol B*, si riesce ad osservare una riflessione (o ritorno di radiazione) della luce di *Algol A* dalla stessa *Algol B*. La luce cosí riflessa varia al modo del chiaro di luna, a seconda che *Algol B* sia "nuova" oppure "piena".

cerche, si riusciva a precisare che il numero due e mezzo faceva parte d'un messaggio inviato da una stella, della quale non era sospettata né l'esistenza né l'azione perturbatrice: *Algol C*.

Cosí ha lieta fine la novella dell'astro che ricorda la testa anguicrinita di Medusa — la pietrificante Gorgone decapitata dal gigante favoloso — nella costellazione di *Perseo*.

Non v'è agente di polizia infallibile. In questa novella, il nostro aveva preso le mosse da un'ipotesi ragionevole ma falsa; e se ne sarebbe accorto subito, se non fosse stato dell'ingannevole traccia indicata da un individuo che aveva assistito al crimine e sembrava avvalorasse quell'ipotesi. Grave disavventura; ma le dobbiamo di poter raccontare una novella poliziesca che vince ogni confronto.

## LA NOVELLA DELLA COMPAGNA DI SIRIO

Quest'altra può intitolarsi: ''Il messaggio senza senso''.

*Sirio* è la stella piú cospicua dei nostri cieli e, osservata di frequente nell'antichità, ha servito agli astronomi, insieme con altre stelle luminose, per determinare l'ora e regolare gli orologi. Era, come si dice oggi, una stella oraria; ma non valeva certo un cronometro, se per alcuni anni anticipava di continuo ed in seguito ritardava. Il Bessel, nel 1844, dava ragione di quest'irregolarità, osservata

molto prima, scoprendo che *Sirio* descrive un'orbita ellittica. E poiché doveva esservi qualche corpo intorno al quale *Sirio* rivoluiva, si giungeva a riconoscerlo in una stella, o compagna oscura, che nessuno aveva mai visto prima o avrebbe sperato di vedere.

La compagna di *Sirio* costituisce forse il primo esempio di scoperta d'una stella invisibile; ma non perciò le si conviene l'attributo di ipotetica. Di fatto, le proprietà meccaniche della materia sono molto piú definitive della visibilità, che è proprietà accidentale; né possiamo affermare che un vetro trasparente sia un oggetto ipotetico. Vicino a *Sirio* v'era qualche cosa che manifestava la piú universale proprietà meccanica della materia: una forza agente, secondo la legge della gravitazione, sulla materia prossima, e quindi la prova, certo piú valida della certezza che acquistiamo coll'occhio, dell'esistenza di una massa materiale. Per altro, diciotto anni dopo, la compagna di *Sirio* veniva anche riconosciuta visualmente, da Alvan Clark; e la scoperta può essere noverata come l'unica del genere, siccome il Clark non già s'era dato ad osservare *Sirio* perché la stella lo interessava per se stessa; ma solo perché costituiva un punto luminoso ideale per saggiare le caratteristiche ottiche d'un nuovo e potente obbiettivo costruito dalla sua Casa. V'è da scommettere che egli, visto il piccolo punto luminoso accanto a *Sirio*, si turbasse alquanto e si desse a pulir meglio la lente per eliminare l'intruso. Ma questo tuttavia non scompariva, piú generoso di chi lo voleva eliminare; e vi riconoscevano

a buon diritto la compagna di *Sirio*, notissima sebbene, come dicevasi, non mai veduta prima d'allora.

I potenti telescopi moderni fan vedere facilmente questa stella, impoverendone un poco la suggestione romanzesca. E ci dorremo se, scomparso il romanzo, la scienza si arricchisce? Oggi sappiamo che la compagna di *Sirio* è una stella di massa non molto inferiore alla massa del *Sole*, piú precisamente pari ai quattro quinti di essa, mentre la sua luminosità non è se non un trecentosessantesimo di quella del medesimo astro. La relativa esiguità di questo valore non stupí molto[1]; infatti, ritenendosi che vi fossero stelle calde-bianche, portate all'incandescenza e splendenti vividamente, e stelle al calor rosso di piú debole splendore, e stelle a tutti i gradi intermedi di luminosità, veniva ammesso che la compagna di *Sirio* fosse una stella allo stadio del calor rosso nascente.

Ma, nel 1914, il prof. Adams trovava all'Osservatorio di Monte Wilson che la compagna di *Sirio* non era una stella rossa, bensí bianco-incandescente. Perché mai, quindi, non si accendeva d'un vivo splendore? La sola risposta possibile appariva questa: che la stella fosse piccolissima. Era giustificato, alla stregua della natura e del colore della luce, che la sua superficie brillasse piú intensamente del *Sole*. Però, se la quantità totale della luce emessa era soltanto un trecentosessantesimo di quella solare, ne do-

[1] Al tempo cui ci riferiamo, la relazione fra la massa e lo splendore non era nemmeno sospettata.

veva discendere l'imprescindibile conclusione che la superficie della compagna di *Sirio* non raggiungesse neppure il valore d'un trecentosessantesimo della superficie del *Sole*, e quindi che il suo raggio fosse inferiore — come appare da una semplicissima operazione numerica — ad un diciannovesimo del raggio solare. Cosí, a rigore di logica, venivano attribuite alla compagna di *Sirio* dimensioni convenienti ad un pianeta meglio che ad una stella.

Eseguiti i calcoli con piú accurata precisione, si trova infatti che questa stella è un globo di dimensioni intermedie fra la *Terra* ed il pianeta che le succede nell'ordine crescente dei diametri: *Urano*. Ora, immaginando di costringere, dentro un globo di dimensioni poco maggiori di quelle terrestri, una massa non molto piú piccola del Sole, occorrerà comprimere enormemente la materia. Quindi dovremo ammettere un'elevatissima densità, ed invero quella della compagna di Sirio risulta pari a sessantamila volte la densità dell'acqua: press'a poco una tonnellata per ogni sedici centimetri cubi.

Quanto sappiamo intorno alle stelle è frutto della interpretazione de' messaggi trasmessi dalla loro luce. Il messaggio della compagna di *Sirio*, tradotto nel nostro linguaggio, suonava cosí: Sono costituita di una sostanza che è tremila volte piú densa d'ogni altra che mai voi uomini abbiate conosciuto: una tonnellata della mia sostanza, al pari d'una minuscola pepita, sarebbe contenibile in una scatola di fiammiferi. Gli fecero il viso dell'arme, l'anno (1914) che venne decifrato; e si credette di leggervi né piú né meno d'una fandonia. Non cosí

dieci anni dopo, quando la teoria esposta nella prima conferenza poteva ritenersi già a buon punto. Si ricorderà come la medesima teoria indichi la possibilità che la materia delle stelle venga compressa fino ad una densità molto maggiore di quelle rivelate dall'esperienza terrestre. Questo risultato fece tornare alla mente il messaggio della compagna di *Sirio*: non lo si doveva piú considerare come una evidente sciocchezza, e se non poteva essere creduto senz'altro vero, appariva tuttavia meritevole di giudizio e di prova, come invece non avrebbe potuto una filza di parole messe insieme senza alcun senso.

Bisogna intanto dire, che era molto difficile sbagliare nell'interpretazione del messaggio e considerarlo errato. Non v'ha dubbio che la massa sia pari ai quattro quinti della massa solare ed anzi essa va tenuta in conto come la massa stellare meglio determinata. Di piú, è chiaro che la medesima massa debba essere ben notevole, se riesce a sviare *Sirio* dalla sua traiettoria, obbligandola puntualmente al ritorno. È invece meno diretta la determinazione del raggio, ma il metodo seguíto ha riscosso, in applicazioni fatte ad altre stelle, il conforto di risultati quanto mai soddisfacenti: ad esempio, il valore del raggio della gigantesca *Betelgeuse* ha trovato conferma in quello ottenuto successivamente, e direttamente, col mezzo d'un interferometro ideato dal Michelson. Aggiungasi che la compagna di *Sirio* non è la sola stella provveduta di caratteristiche altrettanto peculiari. Almeno altre due ci han fatto giungere messaggi coll'annunzio di densità cosí incredibilmente elevate; e, alla stregua dei ristretti

mezzi da cui sono soccorse le nostre ricerche in questo campo appare probabile che l'Universo sia relativamente ricco di simili stelle, note con il nome di ''nane bianche''.

Ma non dobbiamo affidarci ad una sola guida la quale potrebbe pur tradire ad un'imprevista occasione; e forse per questo motivo il prof. ADAMS si mise al lavoro nel 1924, sottoponendo il messaggio ad una prova cruciale. La teoria di gravitazione einsteiniana indica che tutte le righe dello spettro d'una stella sono spostate livemente verso l'estremo rosso, in confronto alle righe corrispondenti d'una sorgente terrestre. Quest'effetto si manifesta pure, naturalmente, per il *Sole*, ma con valori molto piccoli, e riesce difficile rivelarlo, anche per il motivo che fa parte d'un lieve spostamento il quale deriva da molteplici cause non facilmente sceverabili.

Secondo la nostra personale opinione, la teoria di EINSTEIN afferma l'esistenza dell'effetto con una sicurezza maggiore di quella che giustificherebbero i risultati dei nostri attuali mezzi di osservazione. E però stupisce che quanti si sono dati a queste indagini ammettano unanimi la realtà dell'effetto in rapporto al *Sole*, sebbene taluni fossero dapprima persuasi della chiara avversione manifestata al proposito dall'esperienza. Finora l'astronomo osservatore ha considerato la teoria di EINSTEIN come un corpo di dottrina da accertare. Qui la teoria ha invece una buona occasione per illustrarci la propria fecondità: sovviene, infatti, a verificare qualcosa ch'è molto piú incerto della teoria medesima. Poiché l'effetto EINSTEIN è proporzionale alla massa divisa

pel raggio della stella, essendo molto piccolo il raggio della compagna di *Sirio* (se crediamo esatto il messaggio), l'effetto dovrebbe essere molto notevole: trenta volte piú grande che per il *Sole*; e quindi tale da poter essere distinto molto bene dalle cause secondarie dello spostamento dei raggi; le quali, come dicevamo, rendono mal sicura la prova della sua esistenza in rapporto al *Sole*.

L'osservazione dell'effetto è nondimeno difficilissima anche a riguardo della compagna di *Sirio*. La luce di questa è infatti troppo debole per una ricerca del genere; e vi si aggiunge il grave disturbo della luce diffusa dal formidabile splendore dell'astro vicino. Ma, dopo un anno di sforzi, il prof. ADAMS poteva alfine eseguire con fortuna le necessarie misure, ed accertare, pel valore medio del notevole spostamento previsto — secondo l'unità di misura in uso, che è il chilometro al secondo —, la cifra di 19 chm./sec., non molto discosta da quella di 20 chm./sec., indicata dalla teoria.

In tal modo il prof. ADAMS — facendo, come si dice, un viaggio e due servizi — stabiliva una nuova prova della seconda relatività di EINSTEIN, e rivelava in pari tempo che, nell'universo stellare, non soltanto la materia può esistere ad una densità almeno duemila volte piú grande di quella del platino[1], ma esiste di fatto. Cosí ha anche confor-

[1] Le nostre locuzioni "gas perfetto della densità del platino" e "materia duemila volte piú densa del platino" sono state spesso fuse da altri in una sola del tenore: "gas perfetto duemila volte piú denso del platino". È certo

tato ottimamente la nostra opinione che la densità del *Sole* — pari a 1.5 volte quella dell'acqua — sia lontana dalla densità massima della materia stellare; che quindi sia ragionevole supporre nella materia solare il modo di comportarsi d'un gas perfetto.

Abbiamo detto dell'estrema difficoltà di queste osservazioni. Però la grande perizia e la lunga esperienza dell'eccellente osservatore non ci possono indurre a riporre cieca fiducia in un risultato che ha richiesto il soccorso di troppa abilità; e crediamo occorra aspettare il confronto coi risultati d'altre indagini, compiute indipendentemente l'una dall'altra. Pel momento il consiglio migliore è di accogliere queste conclusioni con ogni riserva.

Ma la Scienza non è un semplice catalogo di fenomeni accertati nell'Universo; è un mezzo di progresso, qualche volta tortuoso, qualche altra mal sicuro, e non ci interessa soltanto pel desiderio di conoscere i fatti piú recenti e di poterli aggiungere al novero dei precedenti. Invero ci piace discorrere le nostre speranze ed i nostri timori, il probabile e l'atteso.

Abbiamo narrato l'avventura poliziesca della compagna di *Sirio* fino al punto cui è giunta oggi. Ed ignoriamo se, come quella di *Algol*, possa giudicarsi conclusa (v. Appendice A).

---

difficile calcolare lo stato in cui potrà trovarsi la materia della compagna di *Sirio*; ma non ci attendiamo davvero che sia quello d'un gas perfetto.

## ATOMI NUOVI ED INTERPRETAZIONE DEGLI SPETTRI

Siamo ben lontani dal supporre che questa materia cosí densa sia una sostanza nuova, costituita di uno o piú elementi ignoti. Essa altro non è se non materia ordinaria, che l'elevatissima temperatura ha frantumato rendendola suscettibile di piú energica compressione, all'istessa guisa che, fracassando qualche ossa ai malcapitati ospiti, riuscisse di stipare in una sala una folla piú numerosa di quella che potrebbe esservi contenuta normalmente. L'astrofisica ha, fra i suoi compiti, quello di rivelarci gli elementi ordinari della *Terra* in condizioni straordinarie; cioè: disgregati od ionizzati ad un grado non mai raggiunto — tranne in qualche caso, e a prezzo di enormi difficoltà — nei laboratori. Né solo nell'interno inaccessibile delle stelle, troveremo la materia in uno stato affatto trascendente l'esperienza terrestre.

La fig. 14 riproduce una fotografia della nebulosa anulare (Fig. 15) della *Lira*, eseguita mediante un prisma. Per questo vi si vedono le immagini di numerosi anelli, anziché d'uno solo, i quali corrispondono alle diverse righe spettrali della luce della nebulosa, e rappresentano le diverse specie di atomi che concorrono a produrre la luce medesima. (Per intenderci meglio: ad ogni riga o gruppo di righe spettrali corrisponde un elemento, e le immagini multiple prodotte dal prisma corrispondono ciascuna alle

righe od alla riga d'un dato gruppo, e quindi ad un elemento). L'anello indicato dalla freccia, il piú piccolo ed anche il meno chiaro, è dovuto alla luce prodotta dagli atomi d'elio — s'intende parzialmente disgregati — contenuti nella nebulosa. E il prof. A. Fowler, con uno dei risultati piú sorprendenti delle ricerche di laboratorio dei giorni nostri, riuscendo nel 1912 a demolire qualche atomo d'elio in un tubo a vuoto, ottenne la stessa sorta di luce, già osservata spessissimo nelle stelle. Altri due anelli sono dovuti all'idrogeno. Ove se ne tolga questi tre, nessun altro anello ha potuto essere riprodotto nei nostri laboratori; ed ignoriamo, ad esempio, quali elementi possano farsi corrispondere ai due anelli brillanti che sono situati agli estremi della figura 14 e, secondo recenti indagini, sembrerebbero dovuti ad ossigeno ed azoto altamente ionizzati, cioè privi di due o tre degli elettroni piú esterni.

A quanti domandano talvolta se nelle stelle appaiano nuovi elementi, non esistenti o non ancora scoperti sulla *Terra*, possiamo con sicurezza rispondere di no, senza tuttavia ammettere che tutti quelli osservati nelle stelle siano stati identificati con elementi terrestri già conosciuti. La risposta, tuttavia, meglio che all'astronomo si appartiene al fisico. E questi ci dice che, nella sua rigorosa tabella di classificazione degli elementi, non ci sono posti vacanti se non per elementi a peso atomico molto grande; i quali sono certo poco adatti ad elevarsi nelle atmosfere stellari e a manifestarsi, quindi, alle osservazioni astronomiche.

A tutti gli elementi viene attribuito un numero,

dall'idrogeno cui spetta l'1, all'uranio cui spetta il 92. Orbene, questo numero d'ordine è tanto connesso all'elemento, che il fisico riesce a leggerlo con sollecita facilità. I fisici riescono cioè a stabilire che un elemento, poniamo il ferro, si trova al 26° posto, senza dover contare quanti elementi lo precedono; e, fatto l'appello degli elementi pel loro numero, tutti gli rispondono «presente» fino all'84° [1].

L'elemento elio (numero 2) fu dapprima scoperto sul *Sole*, da N. LOCKYER, e successivamente sulla *Terra*. Ma potrà arridere agli astrofisici la speranza che un evento simile si ripeta? O non sarà ben difficile scoprire elementi... che non ci sono? È vero: l'ignota sorgente dei due vicinissimi anelli (uno debole e l'altro intenso) situati sulla destra della figura 14 è stata chiamata, con un nome nuovo, ''nebulio''; ciò nondimeno, il nebulio non è un nuovo elemento. Dev'essere un elemento molto comune, sebbene non ancora identificato, per la ragione che, in conseguenza della perdita di parecchi elettroni, è quale un amico d'antica data, difficilmente ravvisabile d'acchito, quando lo si riveda dopo molto tempo senza capelli e senza baffi. Ma verrà il giorno che riconosceranno anche il nebulio [2].

---

[1] Gli elementi che corrispondono ai numeri 43, 61, 75 sono stati oggetto di scoperte recenti, che vogliono conferma. In piú degli elementi di là dall'uranio, restano cosí solo due lacune, in corrispondenza dei numeri 85 ed 87; ma anche queste lacune sembra siano state colmate, per merito dell'ALLISON, fra il 1930 ed il 1931.

[2] È stato infatti riconosciuto, come si leggerà nell'Appendice B (*C*).

Intanto, i fisici teorici si dànno alla ricerca di leggi per l'esatta determinazione della natura della luce emessa dagli atomi nei varî gradi di mutilazione: la possibilità di individuare gli atomi, mediante la luce che essi emettono, viene in tal modo ridotta ad una mera questione di calcolo. I fisici sperimentali, dal loro canto, stanno cercando mezzi sempre piú potenti per frantumare gli atomi; e può darsi che un giorno riescano ad eccitare qualche atomo terrestre, cosí da farne emettere la medesima luce del nebulio. È una corsa in grande stile, e non sappiamo chi possa vincerla. Certo l'astronomo potrà fare ben poco per soccorrere i fisici nella soluzione del problema da lui medesimo proposto; ma crediamo che se egli misurasse con molto rigore il rapporto d'intensità delle due righe del nebulio, le indagini dei fisici ne trarrebbero vantaggio. Altra guida, sebbene non facile, verrebbe ad essi offerta dalla diversa grandezza degli anelli quali appaiono nella fotografia, essendo un indice della varia distribuzione degli atomi emettenti la luce. Senza dubbio si manifesta, ad esempio, una preferenza del nebulio per le parti esterne della nebulosa, e dell'elio pel centro; ma non possiamo riconoscere il motivo di questa disuguale simpatia.

Tanto gli atomi di elementi diversi, quanto gli atomi d'un medesimo elemento in differenti gradi di ionizzazione, emettono ciascuno una serie di righe caratteristiche, rivelate dall'analisi spettroscopica della loro luce; e sono righe brillanti in date condizioni, quali si verificano nelle nebulose; e sono piú spesso righe oscure sopra un fondo continuo. Grazie

a queste righe, possiamo in entrambi i casi identificare l'elemento, purché l'atomo non si trovi in uno stato ignoto all'esperienza terrestre. Cosí l'avventata profezia, che non giungeremmo mai a stabilire la composizione chimica degli astri, trova nei fatti una smentita definitiva: elementi comuni come l'idrogeno, il carbonio, il calcio, il titanio, il ferro e molti altri, sono stati per anche riconosciuti nelle piú lontane regioni dell'Universo, ed ormai nessuno piú si commuove a queste canute scoperte [1].

Col tempo la spettroscopia è andata allargando i suoi confini: dall'analisi chimica, ch'era il suo primo compito, s'è estesa all'analisi fisica. Per suo mezzo, come da un buon amico — al quale, dopo averlo riconosciuto, domandassimo notizie del suo stato —, individuato un atomo stellare, e fatti i convenevoli d'uso, ci potremmo sentir rispondere: « Sto benissimo », oppure: « Son demolito », a seconda dei casi. Suggestiva ed eloquente risposta, che basta a darci un'idea e dell'ambiente dove vive il laconico atomo e della severa regola alla quale viene sottoposto; a suggerirci, quindi, le condizioni di temperatura e di pressione ivi esistenti.

Esaminando la serie delle stelle, dalle piú fredde alle piú calde, possiamo ora seguire l'evoluzione degli atomi di calcio, dapprima integri e quindi ionizzati, una volta e poi due; ciò che costituisce un segno

---

[1] Finora gli spettrogrammi delle atmosfere stellari ci hanno rivelato una cinquantina di elementi terrestri; ed è recente la scoperta dell'ammoniaca e del metano — composti di regola prodotti dalla decomposizione di sostanze organiche — nell'atmosfera di *Giove* (*C*).

Fig. 14. — La nebulosa anulare della Lira
fotografata attraverso un prisma dal dr. W. H. Wright nell'Osservatorio Lick.

* Fig. 15. — La stessa nebulosa, fotografata con processi normali.

(*Monte Wilson, 1 luglio 1910*)

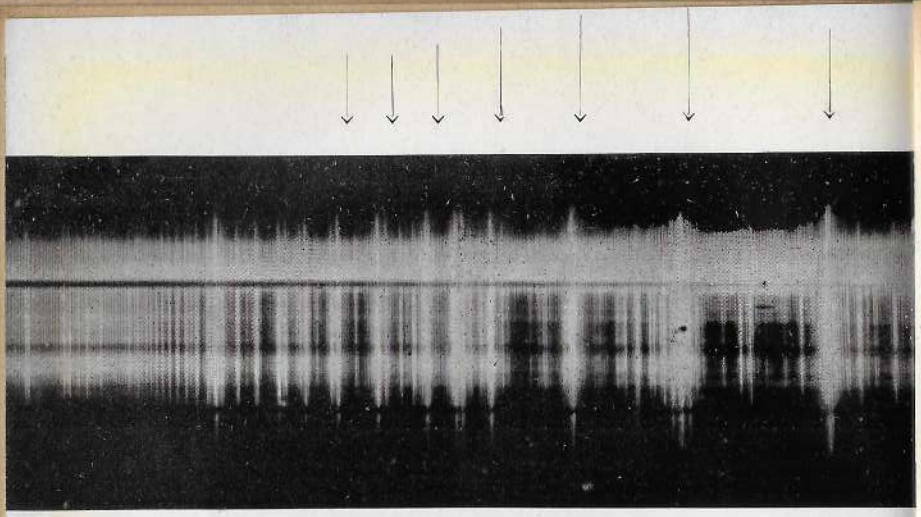


Fig. 16. — Spettro dell'idrogeno: serie di BALMER.

chiaro della crescente intensità del bombardamento al quale, come la temperatura va crescendo, soggiacciono gli atomi. (L'ultimo stadio è contraddistinto dalla scomparsa d'ogni visibile segno di calcio, perché gli ioni con due elettroni di meno non emettono righe nella regione visibile dello spettro.) Analoghe e graduali variazioni sono state verificate anche per altri elementi, ed i progressi raggiunti in questo campo traggono origine dalle ricerche del prof. Megh Nad SAHA, che nel 1920 applicò per primo le leggi quantitative della fisica alla determinazione del grado di ionizzazione corrispondente ad una data temperatura e ad una data pressione. Questo fisico indiano schiuse in tal modo, alle indagini astrofisiche, nuovi e fecondi orizzonti. Individuata nella serie stellare la regione in cui gli atomi integri di calcio sono sostituiti da atomi che hanno perduto un elettrone, la teoria fisica ci permette infatti di stabilire la temperatura, o la pressione che vi corrisponde [1].

I metodi del SAHA hanno avuto, in seguito, perfezionamenti da parte di R. H. FOWLER e di E. A. MILNE, ed una loro importante applicazione va citata nel calcolo della temperatura superficiale delle stelle piú calde (da 12 mila a 25 mila gradi centigradi), alle quali mal si convenivano i metodi adottati per le stelle piú fredde. E va pure fatta menzione d'un altro notevolissimo risultato, nella scoperta, che in

[1]) Non la temperatura e la pressione ad un tempo; ma l'una ove sia nota l'altra, e viceversa. Ecco una preziosa informazione la quale va aggiunta a quelle provenienti da diversa fonte, sulle condizioni relative alla superficie delle stelle.

una stella, o piú propriamente a quel livello che si osserva collo spettroscopio, la pressione raggiunge appena il decimillesimo di atmosfera, mentre prima, senza l'appoggio di alcuna prova rigorosa, veniva giudicata press'a poco uguale alla pressione atmosferica terrestre.

Sebbene il metodo d'analisi spettrale sia fatto servire, di regola, per riconoscere gli elementi che partecipano della composizione d'un dato minerale terrestre, gli possiamo concedere la nostra fiducia anche in rapporto allo studio delle stelle, giacché allo scopo è indifferente che la luce provenga da un corpo vicino od abbia dovuto impiegare centinaia di anni prima di giungere allo spettroscopio dagli spazî siderali.

Non va dimenticato tuttavia come l'applicazione del medesimo metodo allo studio delle stelle possa trovare impedimenti, che lo scienziato non sa eliminare. Quando il chimico, poniamo, cerca l'azoto in un minerale, ha la possibilità di disporre l'esperimento in quelle condizioni che la sua esperienza suggerisce piú propizie al manifestarsi dello spettro dell'elemento. Studiando le stelle, bisogna invece lavorare nelle condizioni che troviamo, senza speranza di riuscire a mutarle. E però, se l'azoto non appare alle nostre ricerche, non se ne può affermare l'assenza: può darsi che l'atmosfera stellare non si trovi nelle condizioni favorevoli all'esperimento. Per citare un esempio, nello spettro di *Sirio*, le righe dell'idrogeno sono marcatissime e soverchiano le altre; non possiamo per altro affermare che *Sirio* sia composto principalmente di idrogeno, ma soltanto

che la sua superficie è ad una temperatura prossima ai diecimila gradi, pel fatto che questa temperatura è appunto, come sappiamo calcolare, la piú favorevole ad una maggiore intensità delle righe d'assorbimento dell'idrogeno. Nel *Sole*, le righe piú intense appartengono al ferro; ma non perciò affermeremo che il *Sole* è soprattutto ricco di ferro; bensí che l'astro si trova ad una temperatura relativamente bassa, cioè di 6 mila gradi, adatta alla produzione dello spettro del ferro.

Si pensava una volta di poter leggere nella maggior ricchezza di idrogeno in *Sirio*, e di elementi metallici nel *Sole*, i segni di un'evoluzione atomica; vale a dire, della trasformazione dell'idrogeno in elementi piú pesanti, man mano che la stella, raffreddandosi, passa dallo stadio di *Sirio* a quello solare. Oggi nulla può giustificare piú un'interpretazione di tal fatta; la scomparsa delle righe dell'idrogeno e la cresciuta intensità dello spettro del ferro sono inevitabili, quasi fatali, dipendenti dall'abbassamento della temperatura. Si riesce per altro a comporre nei laboratori le medesime apparenze di evoluzione degli elementi, che noi sappiamo anche *a priori* mendaci.

È invero probabile che gli elementi chimici siano distribuiti nelle stelle in proporzioni analoghe a quelle verificate nel nostro pianeta: tutto lo farebbe supporre e, in rapporto a taluni elementi piú diffusi, ne possediamo anche convincenti testimonianze. Ma, come nella *Terra* sappiamo determinare la proporzione dei varî elementi ond'è costituita limitatamente una certa profondità, cosí potremo determi-

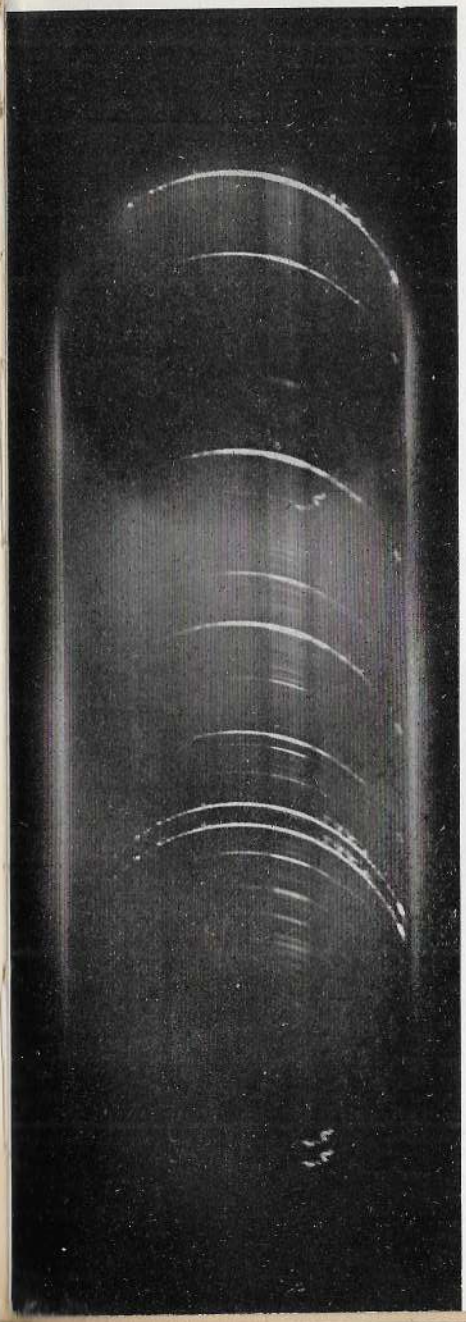
nare una proporzione consimile riguardo alle stelle, purché vogliamo limitarci agli strati esterni. Perciò la nostra conclusione, affatto provvisoria, non consente precipitate illazioni.

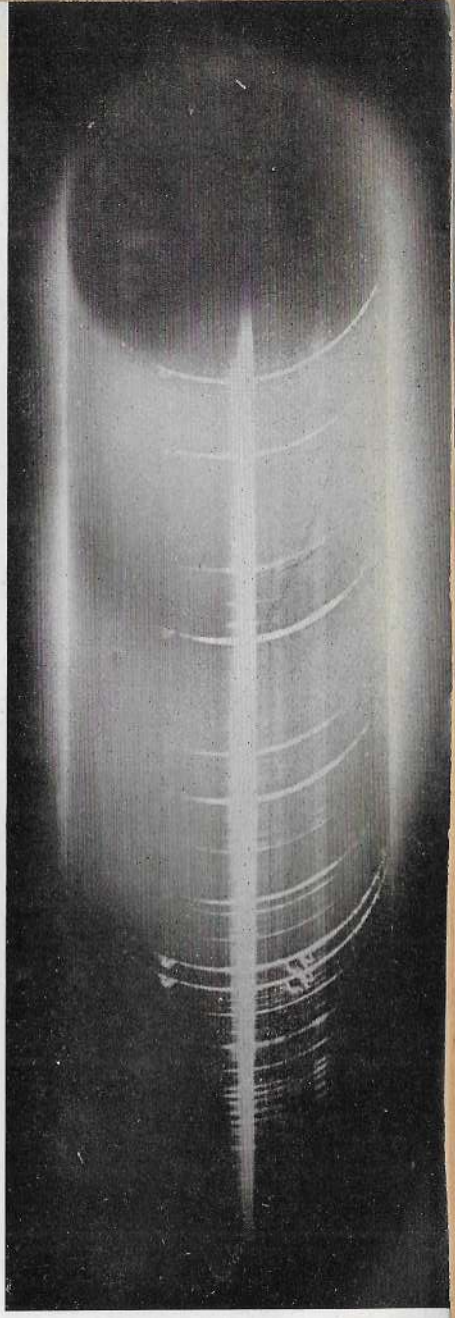
## SERIE SPETTRALI

Per chiarire meglio questo ragionamento, giova considerare lo spettro della figura 16, cercando di vedere quali nozioni se ne possano trarre. Vi riconosciamo anzi tutto, senza fatica, una serie molto regolare di righe brillanti e, col sussidio delle frecce esterne alla fotografia, alcune delle prime righe della serie, le quali vengono distinte dalle numerose altre che vi si trovano frammischiate. Osservando che lo spazio fra le righe successive decresce da destra a sinistra, è anche facile intuire come lo spettro continui almeno per altre quindici righe di là dall'ultima segnata a sinistra; le righe finiscono poi per unirsi formando cosí la ''testa'' della serie spettrale, nota come la serie di Balmer (dal nome di quel fisico svizzero) e dovuta all'idrogeno. Esaminato lo spettro, possiamo affermare che tra gli elementi esistenti nella sorgente luminosa v'è l'idrogeno; ma in tal modo non abbiamo fatto se non il primo passo, e dovremo muovere verso altre deduzioni.

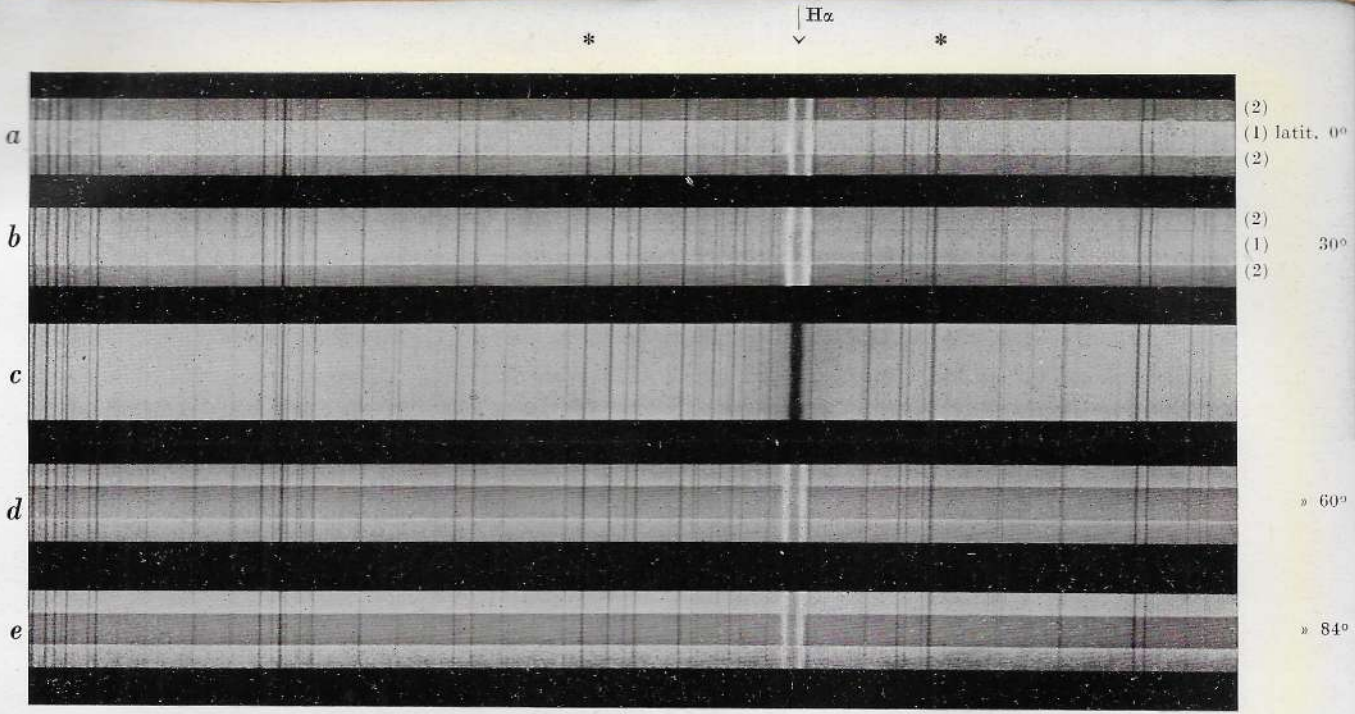
Secondo la teoria del prof. Bohr sull'atomo di idrogeno, ogni riga della serie proviene da uno stato caratteristico dell'atomo che l'emette, e questi ''stati di eccitazione'' possono essere numerati consecutivamente a partire dal numero uno, che viene attri-

* Fig. 17. — *Flash spectrum*, o spettro invertente, fotografato dalla spedizione italiana in Crimea per l'ecclissi del 21 agosto 1914.





* Fig. 18. — Altra fotografia, pur essa eseguita dal TAFFARA, dello spettro *flash*.




* Fig. 19 — Spettri dei lembi *a*, *b*, *d*, *e* e del centro *c* del Sole nella regione rossa dello spettro, con la riga Hα dell'idrogeno. La riga Hα al centro del Sole è oscura: è cioè una riga di assorbimento; ai lembi è invertita, cioè di emissione. — Va rilevato, nelle righe contrassegnate coi due asterischi, lo spostamento dovuto alla rotazione dell'astro (v. Pag. 80) essendo lo spettro interno (1) quello del lembo est; gli spettri (2) quelli del lembo ovest.

(*Torre solare di Arcetri; fotografia Abetti*)

buito allo stato normale dell'atomo di idrogeno. Le radiazioni emesse nei primissimi stati sono comprese nella regione spettrale non contenuta nella figura, l'estrema riga destra della quale corrisponde allo stato n. 8. Contando quindi verso sinistra, riconosceremo le righe successive, fino a quelle che s'appartengono allo stato n. 30. Questi stati successivi corrispondono ad atomi via via piú gonfiati, ché l'unico elettrone planetario dell'idrogeno[1] compie intorno al nucleo un circuito sempre piú largo. Il raggio, o piú propriamente il semiasse maggiore (trattasi di ellissi e non di circonferenze), dell'orbita elettronica è infatti proporzionale al quadrato del numero caratteristico dello stato; e però l'orbita corrispondente allo stato n. 30 è novecento volte piú grande di quella che spetta allo stato n. 1: all'incirca un decimillesimo di millimetro.

Bisogna ora osservare che lo spettro della figura 16 non può essere stato prodotto in un laboratorio terrestre. Se, infatti, anche alle maggiori rarefazioni ottenibili nelle esperienze di spettroscopia terrestre, gli atomi sono ancora cosí stipati da non lasciare spazio sufficiente alle orbite di tanta estensione; certo il medesimo spettro deve provenire da una sorgente luminosa formata di materia tanto rarefatta da permettere all'elettrone di percorrere sí vasta orbita senza collidere con altri corpuscoli, od essere disturbato dagli altri atomi. Facendo grazia di

---

[1] L'idrogeno, che è l'elemento 1, ha l'atomo costituito di un solo protone, formante il nucleo, e di un solo elettrone extra nucleare, che è tutta la " crinolina " dell'elemento (*C*).

piú minuti particolari, diremo insomma che la figura 16 è lo spettro d'una materia piú rarefatta di quanto è possibile ottenere colle esperienze terrestri intese a produrre le rarefazioni piú spinte[1].

Importa rilevare che il fondo su cui campeggiano le righe, mentre è oscuro in quasi tutto lo spettro, si fa invece brillante verso l'estremità sinistra precisamente là dove finisce la serie di BALMER. Anche tal fenomeno è dovuto all'idrogeno. Invero gli atomi i quali si trovano allo stato n. 30, o all'incirca in questo stato, sono pericolosamente prossimi al punto di esplosione, ed è anzi ben naturale che taluni di essi, oltrepassato siffatto limite, esplodano e, perduti gli elettroni planetari, si dian d'attorno per catturarne di nuovi. Ma, come si ha assorbimento d'energia quando vien strappato un elettrone da un atomo, cosí, allorché l'atomo riesce a domare un elettrone selvaggio, si ha una liberazione di energia; e questa, venendo irradiata dall'atomo, forma il fondo brillante di cui si diceva. Omettiamo anche qui i particolari tecnici della teoria: è certo ben naturale che la luce dovuta agli atomi esplosi appaia nello spettro subito di là dalle righe corrispondenti agli atomi piú gonfiati, se appunto esplodono per effetto dell'eccessiva dilatazione.

---

[1] La figura 16 riproduce una fotografia dello "spettro *flash*" della cromosfera solare, eseguita dal DAVIDSON, a Sumatra, durante l'ecclissi del 14 gennaio 1926. *Flash* significa Lampo, e la denominazione deriva dal fatto che questo spettro appare come un lampo, immediatamente prima del secondo contatto e immediatamente dopo il terzo, negli ecclissi totali di *Sole*. Vedansi anche le figure 17 e 18 (*C*).

Rifaremo ora la storia di un'altra celebre serie spettrale: quella scoperta, nel 1896, in talune stelle a temperatura elevata, e nota come la serie di PICKERING, affine alla precedente. Le righe dello spettro di PICKERING distano l'una dall'altra colla medesima regolarità, ma ciascuna di esse viene a cadere fra due righe successive dello spettro di BALMER. Piú precisamente, giacché gli intervalli diminuiscono via via dalla destra verso la sinistra, sono situate là dove verrebbero a trovarsi intercalate le nuove righe che volessimo aggiungere per raddoppiare il numero di quelle primitive, senza turbare la regolarità degli intervalli.

Al contrario della serie di BALMER, quella di PICKERING non s'era mai manifestata ai nostri ricercatori di laboratorio, e però era legittimo domandarsi da quale elemento fosse prodotta. La risposta sembrò allora ovvia. Le due serie, tanto affini che gli elementi dell'una sono intermedi fra quelli dell'altra, dovevano corrispondere a diversi modi di vibrazione dell'atomo di un medesimo elemento: l'idrogeno. Questa risposta, benché allora sembrasse l'unica possibile, oggi va modificata in conseguenza delle cognizioni successivamente raccolte intorno agli atomi.

Dalla semplicità ideale di questi due spettri possiamo a buon diritto dedurre che essi appartengono entrambi al tipo piú semplice dei sistemi atomici possibili; che, cioè, sono prodotti da un atomo con un solo elettrone planetario. Questa condizione indica tuttavia soltanto in qual foggia si veste l'atomo, non già quel che è. E veramente, se ne abbia

vaghezza, l'atomo di elio (ma poco importa che sia un atomo d'uranio) può mascherarsi, prendendo in prestito il succinto abito dell'atomo di idrogeno. L'elio, normalmente con due elettroni planetari, se ne perde uno, diventa simile all'idrogeno, e può venire considerato come una riproduzione di questo, in iscala ridotta; certo è significativo, che la serie di PICKERING appaia solo nelle stelle a temperatura elevatissima, cioè in condizioni adatte alla perdita di un elettrone. La differenza fra l'idrogeno e l'elio ''idrogenoide'' è data in primo luogo dal loro diverso peso atomico — il nucleo dell'elio è quattro volte piú pesante del nucleo d'idrogeno —; ma influisce ben poco sullo spettro, giacché i due nuclei costituiscono aggregati cosí solidi, che la loro saldezza non può venire turbata dalla danza elettronica. In secondo luogo, il nucleo d'elio ha una carica elettrica doppia, ciò che equivale a sostituire nel sistema vibrante una molla di controllo di doppia intensità. Che cosa v'ha di piú naturale che, raddoppiata l'intensità della molla, il numero delle righe spettrali venga anch'esso raddoppiato senza tuttavia modificarne altrimenti la disposizione? Cosí il prof. BOHR scoprí l'origine vera della serie di PICKERING; la quale andava attribuita all'elio ionizzato[1], e non all'idrogeno.

---

[1] La riga dell'elio nella nebulosa anulare della *Lira*, di cui abbiamo già fatto cenno, pur non appartenendo alla serie di PICKERING, ha una storia molto simile. La si suppose dapprima dovuta all'idrogeno; in seguito (1912) il FOWLER l'ottenne nello spettro d'una miscela di elio e di idrogeno; finalmente il prof. BOHR scoprí che apparteneva giusto all'elio.

Mentre l'atomo vibra, il pesante nucleo, sia dell'idrogeno che dell'elio, rimane quasi impassibile: quasi, ma non interamente. In seguito il prof. A. FOWLER, dopo essere riuscito a riprodurre in laboratorio lo spettro di PICKERING, ed averne misurato le righe con esattezza maggiore di quella ottenibile nella spettroscopia stellare, riuscí infatti a provare che il nucleo non rimane estraneo alla vibrazione atomica. S'era però condotti a trasferire nell'interno dell'atomo un delicato problema di stella doppia; ma forse piú stretta analogia può ricercarsi nell'influenza reciproca alla quale soggiacciono *Giove* ed il *Sole*, giacché *Giove*, la cui massa è pari ad un millesimo della massa solare, disturba il *Sole* press'a poco quanto il leggero elettrone disturba il nucleo d'idrogeno.

L'elio ionizzato è una riproduzione in iscala diversa dell'atomo di idrogeno; che risulterebbe perfetta se non fosse della ''scossa'' la quale è piú sensibile per l'idrogeno, poiché il nucleo dell'elio è piú pesante e saldo. Ebbene, appunto per il fatto della diversa scossa, la serie di PICKERING e quella di BALMER vengono a trovarsi leggermente sfasate l'una dall'altra. Misurando questa differenza di fase, il prof. FOWLER ha potuto determinare con molta esattezza il valore della scossa e, di conseguenza, la massa elettronica; cioè 1 : 1844 della massa del nucleo d'idrogeno. Questo valore è in ottimo accordo con quello ricavato mediante altri metodi, e forse nessun'altra determinazione è piú precisa di quella dell'anzidetta massa corpuscolare.

In tal modo, coi mezzi dapprima suggeriti da

stelle lontane cinquecento anni-luce, e quindi usati ora dal fisico teorico, ora dall'esperimentatore, siamo giunti alla cosa piú piccola che si conosca.

## LA NEBULOSITÀ DELLO SPAZIO

Dallo studio della materia piú densa dell'Universo passiamo ora allo studio della materia piú rarefatta [1].

Nonostante i progressi fatti dall'arte di rarefare i gas, siamo ancora lontani dal riuscire a produrre un vero vuoto. Gli atomi contenuti in un tubo non ancora vuotato assommano ad un numero di circa venti cifre; quelli contenuti in un tubo molto rarefatto, allo stesso numero con cinque o sei zeri di meno. Ogni piú energico sforzo per sopprimere un altro zero appare ridicolamente vano: come rosicchiare senza risultato il colossale numero.

Talune stelle sono estremamente rarefatte. Cosí *Betelgeuse,* che per la sua densità (all'incirca un millesimo di quella dell'aria) potremmo dire vuota, se sovvenisse una diversa parola per indicare il vuoto ben piú spinto dello spazio da cui è circondata. E benché oggidí i fisici non incontrino difficoltà a produrre rarefazioni migliori, un tempo la

---

[1] Questo paragrafo accenna ad un argomento che costituisce l'oggetto essenziale della quarta conferenza; ma non lo sopprimiamo, giacché v'è contenuta qualche nozione cui l'Autore si riferisce cammin facendo (*C*).

rossa stella d'*Orione* avrebbe potuto costituire un eccellente esempio di vuoto.

Gli strati superficiali, in ispecie i vasti e tenui contorni delle stelle, come la cromosfera e la corona solare, hanno densità ancora piú basse; e pure rarefattissime appaiono le nebulose gassose. Invero, se è lecito parlare di vuoto vero solo quando si riesca a far posto, fra due atomi adiacenti del mezzo che si considera, ad una testa di spillo, questo grado di rarefazione può dirsi raggiunto — e forse anche superato — al centro della nebulosa di *Orione*.

La densità d'una nebulosa, poiché questa non ha limiti definiti, svanisce a grado a grado e — sembra — piú lentamente al crescere della distanza dal centro del corpo celeste. Perciò un ipotetico viaggiatore, arrivando in prossimità dei confini della sfera d'azione d'una nebulosa, si troverà ad un certo punto anche dentro i confini della sfera d'azione di un'altra nebulosa; quindi, nello spazio intersiderale c'è dovunque una densità residua. Quest'ipotesi, del lento digradare dell'intensità delle nebulose, può essere presa — a parer nostro — quale punto di partenza per la valutazione della quantità di materia dispersa nello spazio.

Una qualsiasi regione nella quale non si osservi alcuna nebulosità dev'essere considerata, almeno entro i limiti del sistema stellare, all'estremo delle rarefazioni esistenti; tuttavia nel volume di sedici centimetri cubi è rimasto all'incirca un atomo. A seconda del modo di vedere, questa quantità di materia costituisce una piena oppure un vuoto, l'uno e l'altro in ugual misura

sorprendenti, dello spazio. Ma forse piú ci fa stupire sotto la specie della piena, se di fatto annunzia che nel sistema stellare non esiste un recondito angolo dove l'atomo si possa sentire veramente solo e cieco al richiamo d'un simile; questo — lontano e vicino — gli sarà distante, tutt'al piú, due centimetri e mezzo!

Consideriamo altrimenti le medesime cose.

Dicevamo, nella "novella di *Algol*", d'un metodo seguíto per misurare la velocità di rotazione del *Sole*. Rivolgendo lo spettroscopio, dapprima ad un orlo del disco solare, poi all'altro opposto, se osserviamo una riga oscura dello spettro, riconosciamo che questa subisce un lieve spostamento passando dall'uno all'altro lembo, e ne desumiamo uno spostamento, di allontanamento o di avvicinamento a noi, della materia cui appartiene la riga. È quanto ci aspettavamo: per effetto della rotazione dell'astro, al suo lembo orientale la materia solare muove verso noi, al lembo occidentale se ne allontana (Pag. 52).

Alcune righe oscure, tuttavia, non manifestano questo spostamento, e permangono al medesimo e preciso posto, tanto se le osserviamo ad est, quanto se le osserviamo ad ovest: la loro origine, quindi, non può essere nel *Sole*. Bisogna invece ammettere che le righe si siano formate dopo che i raggi solari hanno lasciato l'astro e prima di entrare nel nostro telescopio. Ma tutto ciò non significa se non che v'è un mezzo interposto in qualche luogo, fra il *Sole* ed il nostro strumento occhieggiante dalla *Terra*. Per altro, se riconosciamo l'appartenenza di talune di queste righe all'ossigeno, è legittimo ammettere che

il medesimo mezzo sia costituito di una certa quantità di detto elemento.

Sembrerebbe d'essere giunti in tal modo alle soglie d'una scoperta sensazionale; ma dobbiamo prepararci l'animo ad una delusione. Fra il *Sole* e noi, certo esiste un mezzo che contiene ossigeno, un mezzo indispensabile alla nostra esistenza. Ed è... l'atmosfera terrestre, alla quale appunto devonsi attribuire le righe fisse, o stazionarie, osservate nello spettro solare.

All'istessa guisa che lo spettroscopio ci rivela la rotazione solare (Fig. 19); e la rivelano pure le macchie solari, visibili alla superficie dell'astro; esso ci rende noto che talune stelle descrivono un'orbita, e son quindi ciascuna sotto l'influenza di un'altra stella, che può essere visibile, ma anche invisibile. Ebbene, anche in queste osservazioni appaiono talvolta delle righe fisse, le quali non si spostano come si spostano invece le altre. Fra la stella ed il telescopio terrestre dev'esserci però ancora un mezzo stazionario da cui la luce possa raccogliere le righe intruse; ma non potrà piú essere l'atmosfera terrestre, giacché le medesime righe appartengono al calcio ed al sodio, dei quali non esiston vapori nella nostra atmosfera. Di piú, il calcio è nello stato corrispondente alla perdita d'un elettrone, e ciò non potrebbe giustificarsi nelle condizioni dell'atmosfera terrestre. Di conseguenza, il mezzo che contiene il sodio ed il calcio ionizzato — e certo altri elementi che non si manifestano — deve essere indipendente e dalla stella e dal nostro pianeta. L'unico mezzo, che concilia le varie esigenze di queste considerazioni, va quindi

riconosciuto nella cosí detta ''piena'' dello spazio intersiderale già ricordata. Lungo il cammino fra la stella e la *Terra*, la luce, attraversando il mezzo che in ogni sedici centimetri cubi contiene un atomo, cioè percorrendo parecchie centinaia di bilioni di chilometri, ha certo il modo di incontrare quanti atomi bastano a far acquistare allo spettro della luce le righe oscure.

Dapprima veniva data del fenomeno anche un'altra interpretazione, supponendo che le righe fossero prodotte da una nebulosità collegata alla stella, quasi la cingesse di un'aureola. In altre parole, le due stelle componenti il sistema osservato, rivoluendo l'una intorno all'altra, non turberebbero il mezzo nel quale le supponiamo immerse. E l'ipotesi, certo non assurda, è stata oggetto di esperienze basate sulla velocità. Le due componenti, pur potendosi spostare periodicamente avanti e indietro in seno alla nebulosità, avrebbero dovuto avvicinarsi od allontanarsi ad una velocità media (riferita ad un lasso di tempo abbastanza lungo) pari a quella del calcio e del sodio, a meno che ciascuna stella, inverosimilmente, non lasciasse indietro la propria aureola. Il prof. PLASKETT, eseguendo le sue osservazioni col telescopio di 183 cm. (Fig. 26) dell'Osservatorio Victoria nella Columbia britannica (Canadà), trovava che la velocità secolare, o media [1], di avvicinamento

[1] Questa velocità è stata naturalmente dedotta per mezzo delle altre righe spettrali, proprie della stella e soggette a spostamenti periodici, verso il rosso o verso il violetto, durante il moto delle componenti del sistema binario sulla loro orbita.

della stella era in generale molto diversa dalla velocità indicata dalle righe fisse del calcio e del sodio. Questo risultato provava quindi che la materia la quale dà origine alle righe anzidette non può essere comunque aggregata alla stella, perché non si muove con questa.

Procedendo nelle sue indagini, il PLASKETT riusciva anche a dimostrare che, mentre le stelle sono animate da velocità individuali varie, quella della materia da cui in sostanza la luce traeva le righe fisse dello spettro era invece sempre, o press'a poco, la medesima: come se la materia stessa costituisse un mezzo continuo, esteso quanto lo spazio intersiderale. Ciò valeva quanto ammettere, né crediamo possa sussistere alcun dubbio in proposito, l'esistenza d'una nube cosmica avvolgente il sistema stellare. La ''piena'' dello spazio intersiderale, da ipotesi qual era, entra cosí a buon diritto nel novero dei fatti d'osservazione.

Il sistema stellare è dunque immerso in un oceano sterminato; non un oceano di puro spazio o di etere, bensí di materia, popolato anch'esso di atomi, sebbene meno riccamente della materia ordinaria, contenendo un solo atomo ogni sedici centimetri cubi. Oceano placido, senza sensibili moti relativi, viene attraversato forse da correnti di secondaria importanza, in ogni caso molto meno rapide delle stelle di media velocità.

Le cose dette darebbero motivo a trattare numerose questioni, ma ci limiteremo a discorrerne soltanto una o due. Perché gli atomi di calcio sono ionizzati? Anche la calma dello spazio interstellare è

corsa dal tumulto onde gli atomi di calcio venivano disgregati nell'interno delle stelle? Perché neppure gli atomi della nebulosità sono integri? Invero, la demolizione atomica continua pure nei profondi spazî, giacché talune onde della luce stellare che li attraversa sono tanto potenti da strappare agli atomi di calcio uno o due elettroni. Ora, ed è questa una delle scoperte piú sconcertanti della fisica moderna, allorché un'onda luminosa si attenua per effetto della sua stessa propagazione, mentre non ha una perdita di potenza, s'ammala di pigrizia. Cioè, non diminuisce la potenza, ma la probabilità di riuscire ad esercitarla. Precisiamo ancora meglio: se un'onda luminosa è capace di frantumare un atomo, conserverà la sua forza anche dopo essersi ridotta ad un milionesimo per effetto della propagazione; ma, dovendo spendere la sua energia, le sarà necessario diventare un milione di volte piú economa. In altre parole, un atomo esposto a lasciarsi colpire da onde indebolite dovrà di regola attendere l'onda da cui sarà fatto esplodere, per un intervallo di tempo pari ad un milione di volte quello che ci vorrebbe se l'atomo fosse esposto all'azione di onde in pieno vigore. Ma quando l'esplosione si produce, i suoi effetti saranno in ogni caso i medesimi, qualunque sia la perdita di potenza subíta dall'onda che l'ha provocata. Ben altrimenti avviene delle onde marine: se una data onda è riuscita a capovolgere uno scafo, in seguito, quando si sia indebolita colla propagazione, non vi riuscirà piú. Il tiro delle mitragliatrici presenta invece qualche analogia col fenomeno offerto dalle onde lumi-

nose: la probabilità che una mitragliatrice colpisca il bersaglio diminuisce col crescere della distanza; ma se ad un proiettile riesce di colpire il bersaglio, gli effetti non saranno meno distruttivi. Abbiamo in tal modo accennato alla proprietà del *quantum* di luce, che costituisce il mistero piú profondo della energia luminosa.

Cosí anche, nello spazio interstellare, degli elettroni vengono strappati — sebbene molto di rado — agli atomi di calcio, ed a questo riguardo va notato che la bassissima densità della nube cosmica è il fattore decisivo per mantenere la ionizzazione. Invero, le occasioni offerte all'atomo per tornare allo stato normale sono molto rare, e può darsi che esso, vagando per lo spazio, possa incontrare all'incirca un elettrone al mese, senza la sicurezza, tuttavia, di catturare il primo che gli si presenta; sicché tanto rare demolizioni bastano a mantenere ionizzati la maggior parte degli atomi. Lo stato di demolizione degli atomi nell'interno delle stelle può essere paragonato alla devastazione di una casa su cui si abbatta la tormenta; lo stato di demolizione nello spazio intersiderale è una devastazione causata dall'usura e dai guasti ordinari, ai quali si aggiunga la negligenza nell'eseguire le riparazioni.

Il calcolo indica che la maggior parte degli atomi di calcio esistenti nello spazio intersiderale hanno perduto due elettroni, e però non è lecito aspettarne uno spettro visibile. Le ''righe fisse'' son prodotte da quegli atomi che, mancando d'un solo elettrone, si trovano momentaneamente in uno stato piú progredito di ricostruzione. E questi atomi, pur essendo

in ogni momento in numero non superiore al millesimo del totale, bastano a produrre l'assorbimento osservato.

È consueto credere che lo spazio intersiderale sia eccessivamente freddo. Certo un termometro ivi collocato segnerebbe una temperatura di circa 3 gradi sopra lo zero assoluto, ammesso, s'intende, che lo strumento fosse capace di queste esigue registrazioni. La materia compattissima di cui è fatto un termometro, come pure altra materia che fosse estremamente rarefatta quale intende il senso comune, raggiungerebbe invero una temperatura ugualmente bassa. Ma non è lecito dire altrettanto in rapporto a cosí tenue materia com'è quella della nebulosità interstellare. Questa temperatura — alla cui nozione si giunge per altre considerazioni — non è probabilmente molto inferiore alla temperatura superficiale delle stelle piú calde, cioè ai quindicimila gradi. Lo spazio interstellare è, al medesimo tempo, ed eccessivamente freddo ed eccessivamente caldo [1].

---

[1] Siccome la parola "temperatura" è talvolta usata con significati nuovi, preciseremo che colla cifra di quindicimila gradi la temperatura vien fatta corrispondere alle velocità individuali degli atomi e degli elettroni; cioè, alla temperatura dei gas considerata al modo antico.

## LA CROMOSFERA SOLARE

Eccoci di nuovo, cambiando ancora scenario, alle regioni esterne del *Sole*. La figura 21 fa vedere una enorme fiamma, o ''protuberanza'' — per usare il nome che le dànno gli astronomi —, quale di tanto in tanto viene eruttata dal *Sole*. Alta press'a poco duecento mila chilometri, questa protuberanza[1] ha durato piú di ventiquattro ore, assumendo molteplici forme diverse. È però di proporzioni veramente eccezionali e non frequenti, mentre sono comuni fiamme meno elevate. Le pittoresche macchie nere che appaiono nella figura 1, simili a larghi crepacci, sono in realtà protuberanze che si proiettano oscure sul fondo piú brillante dell'astro, e risultano costituite di calcio, idrogeno ed altri elementi.

Qui, molto piú delle protuberanze, ci interessa lo strato dal quale esse sorgono. Oltre la cosí detta atmosfera solare, la quale termina con forme abbastanze nette, incontriamo uno strato molto esteso e rarefatto — la ''cromosfera'' —, formato da pochi elementi scelti fra quelli capaci di galleggiare, non sull'atmosfera, bensí sui raggi del *Sole*. L'arte di cavalcare un raggio solare non dev'essere facile; e la posseggono pochissimi elementi. Fra essi il cal-

---

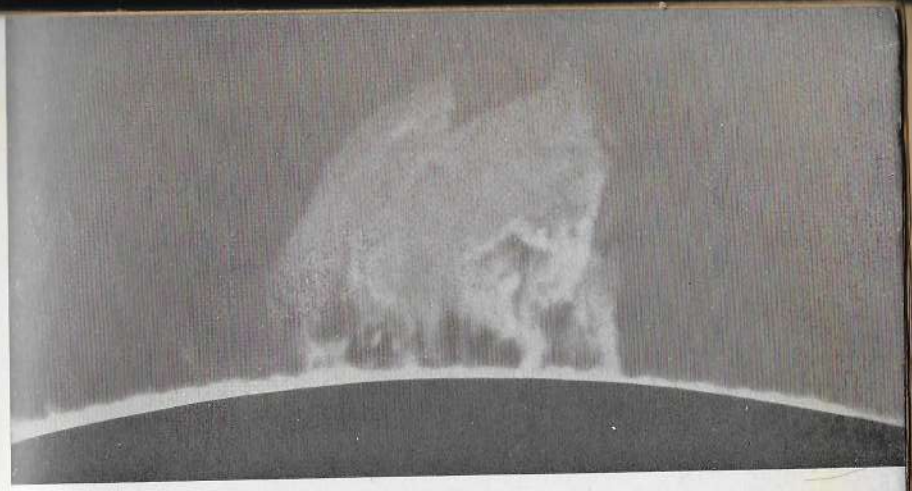
[1] È stata fotografata da E. T. Cottingham e dall'Autore all'Isola del Principe, in occasione dell'ecclissi totale del 29 maggio 1919. Vedasi anche la figura 20.

cio, col suo pesante atomo, fa sfoggio di sicura maestria, che il leggero e svelto atomo d'idrogeno, pur capace di esperte evoluzioni, non può sorpassare.

Lo strato di calcio sospeso sulla luce solare ha uno spessore di oltre ottomila chilometri ed è meglio osservabile quando, come negli ecclissi, la maggior parte del *Sole* si nasconde dietro la *Luna*; ma può essere tuttavia studiato, col mezzo dello spettroeliografo, anche quando l'astro si presenta in tutto il suo splendore. Sebbene nel complesso si trovi in continua quiete, il medesimo strato va soggetto — come mostrano le protuberanze — a violente eruzioni che si lanciano a grandi altezze.

Trarremo ora alcuni ragguagli sulla cromosfera di calcio da una serie di notevoli indagini del prof. E. A. Milne dell'Università di Oxford.

Come avviene che un atomo galleggi sopra un raggio di *Sole*? La ragione di questa possibilità va ricercata nella pressione della luce (Pag. 25). Se un atomo assorbe la luce, che procedendo dal *Sole* verso l'esterno porta con sé una certa quantità di moto diretta nello stesso senso, assorbirà anche questa quantità di moto, e riceverà un leggero impulso diretto verso l'esterno dell'astro, per riguadagnare in tal modo il terreno che andava perdendo nella caduta verso il *Sole*. Gli atomi della cromosfera si mantengono a galla sulla superficie solare, nella foggia di fiocchi che discendono per un poco e poi salgono di nuovo sotto l'impulso della luce; e di essi riusciranno meglio a galleggiare quelli che possono assorbire quantità di luce ragguardevoli rispetto al loro peso. Per capire la ragione



* Fig. 20. — Protuberanza a vortice, osservata da Fox e Abetti il 27 luglio 1908 all'Osservatorio di Yerkes.

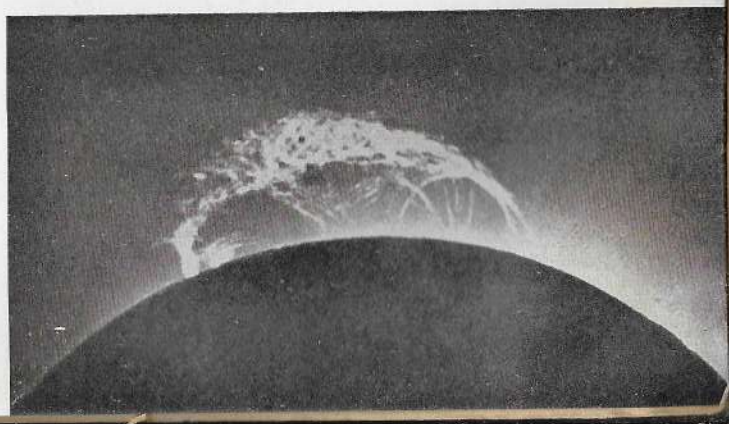


Fig. 21. — Protuberanze solari fotografate da E. T. Cottingham e A. S. Eddington.

onde l'atomo di calcio galleggia tanto bene, fa d'uopo considerare piú da vicino il suo meccanismo d'assorbimento.

Nel sistema elettronico dell'atomo di calcio vi sono due elettroni con legami piú labili degli altri; il calcio è infatti un elemento bivalente, in conseguenza di questi due elettroni, che in particolar modo ne determinano il comportamento chimico. Essi posseggono entrambi un meccanismo per assorbire la luce; ma le condizioni esistenti nella cromosfera provocano la perdita di uno degli elettroni, sicché gli atomi di calcio subiscono una mutilazione uguale a quella che dà luogo alle ''righe fisse'' della nebulosità interstellare. Il calcio cromosferico, cioè, fonda le sue possibilità di galleggiamento, sulla luce solare che può raccogliere per mezzo dell'unico elettrone labile rimastogli: separarsi anche da questo, gli riuscirebbe fatale, giacché contemporaneamente, divenuto incapace di assorbire la luce, precipiterebbe come un pesante sasso. Vero è che, dopo la perdita dei due elettroni, l'atomo di calcio ne conserva altri diciotto; ma questi sono legati tanto solidamente intorno al nucleo, che la luce non porta piú su essi alcun effetto; o, meglio, questi diciotto elettroni potrebbero assorbire soltanto raggi di onde molto piú corte, i quali mancano affatto nella luce solare. L'atomo mutilato non avrebbe salvezza se non riuscisse a riparare il suo meccanismo d'assorbimento principale. Ghermire a volo un elettrone vagante? Sarebbe agevole; ma occorrerebbe incontrarlo, e questo, nella cromosfera rarefatta, è poco probabile, mentre è piú facile che l'atomo cada a precipizio sulla superficie solare.

Due sono i modi nei quali la luce può essere assorbita. O l'atomo lo fa avidamente, fino a scoppiarne, e l'elettrone salta lontano coll'energia esuberante: è il processo di ionizzazione rappresentato nella figura 11, che non può, evidentemente, manifestarsi nella cromosfera, dove all'atomo non è consentito il lusso di perdere l'elettrone. Nell'altro modo d'assorbimento, l'atomo è meno avido, e però non esplode, bensí si gonfia visibilmente, spendendo l'energia superflua per sbalzare l'elettrone sopra un'orbita piú lontana: è il metodo dell'eccitazione (Pag. 72). Dopo essere rimasto per un poco su quest'orbita eccitata, l'elettrone ricade spontaneamente sulla primitiva e cosí via, per ventimila volte al secondo, se l'atomo vuole mantenersi in equilibrio nella cromosfera.

Capiremo adesso perché il calcio possa galleggiare meglio degli altri elementi. Aveva sempre stupito, che un elemento piuttosto pesante (al ventesimo posto nell'ordine dei pesi atomici) si trovasse in queste regioni molto elevate, ov'era da supporsi l'esistenza dei soli elementi piú leggeri. Abbiamo visto or ora, che vien richiesta l'abilità di lanciare un elettrone verso l'alto ventimila volte al secondo, senza mai incappare nell'errore — che avrebbe conseguenze fatali — di lasciarlo cadere. Il giuoco non è facile neppure per gli atomi; ma il calcio[1] vi riesce, e raggiunge precisamente questo numero, perché, possedendo una possibile orbita d'eccitazione vicinissima all'orbita normale, l'elettrone può essere

[1] Ci riferiamo al calcio cromosferico, cioè con un elettrone di meno.

palleggiato fra le due orbite senza seri rischi. Non cosí per la maggior parte degli altri elementi, nei quali la piú prossima orbita utilizzabile è relativamente molto lontana. L'energia che viene richiesta per raggiungere quest'orbita non è molto inferiore a quella necessaria per distaccare interamente l'elettrone; né è detto si possa disporre d'una sorgente continua di luce, capace di provocare il salto orbitale senza qualche volta farglielo fare troppo lungo, determinando di conseguenza la perdita dell'elettrone.

La forte differenza esistente fra l'energia d'eccitazione e l'energia di ionizzazione è un fattore quanto mai favorevole pel calcio; ed il *Sole* è ricchissimo di onde eteree, le quali possono produrre la prima forma d'energia, mentre quasi gli fanno difetto quelle che produrrebbero l'altra.

Il tempo medio impiegato da ciascuna di queste evoluzioni è pari ad un ventimillesimo di secondo, e va diviso in due periodi: nell'uno, l'atomo aspetta senz'ansia che un'onda luminosa precipiti su di esso e gliene distacchi l'elettrone; nell'altro, l'elettrone circola con pari tranquillità sull'orbita esterna, prima di decidersi a prendere la via del ritorno. Il prof. Milne ha mostrato come si possa calcolare la durata dei due periodi, partendo da osservazioni sulla cromosfera: il primo periodo d'attesa dipende dall'intensità del raggio luminoso; il secondo, che piú ci interessa, dipende da una proprietà caratteristica del calcio, non legata alle condizioni locali. Devesi avvertire che le nostre misure concernono gli ioni esistenti nella cromosfera solare, ma che il

medesimo risultato vale anche per gli ioni dello stesso elemento, ovunque questo si trovi. Secondo il MILNE, un elettrone sbalzato sull'orbita esterna di eccitazione vi rimane in media per un centomilionesimo di secondo, prima di ricadere spontaneamente sull'orbita primitiva; e, aggiungeremo noi, in cosí breve intervallo di tempo descrive sull'orbita superiore all'incirca un milione di rivoluzioni.

Può darsi veramente che il lettore non spasimasse dal desiderio di conoscere questo particolare, poiché non appassiona se non quanti hanno un debole per l'atomo. Certo è caratteristico che occorra proprio dirigere un telescopio ed uno spettroscopio verso il *Sole* per scoprire sí semplice proprietà d'una sostanza d'uso pressocché quotidiano. Questo genere di misurazione ha per la fisica un'importanza enorme, poiché la teoria dei salti atomici deriva dalla teoria dei quanti, la quale appare come il piú grande enimma della fisica ed abbisogna dei risultati di osservazioni simili a quelle di cui trattasi. Possiamo senz'altro immaginare la sensazione che ci darebbe un pianeta ove facesse un salto del genere, dopo avere compiuto un milione di rivoluzioni intorno al *Sole*; cercheremmo febbrilmente di determinare l'intervallo medio fra un salto e l'altro! L'atomo rassomiglia un poco al sistema solare, e non è detto che gli tolga importanza il fatto di possedere dimensioni tanto piccole.

Attualmente non si dà altro metodo per misurare il tempo che dura il rilassamento dell'atomo eccitato di calcio; se ne è potuta eseguire tuttavia una determinazione mediante esperimenti su due specie di

atomi diversi dal calcio. Ancorché nulla esiga che il periodo sia il medesimo per tutti gli elementi, le misure di laboratorio dànno anch'esse per l'idrogeno un periodo uguale a un centomilionesimo di secondo; di conseguenza, le determinazioni astronomiche relative al calcio non possono essere sospettate d'errore.

L'eccitazione dell'atomo di calcio è dovuta a radiazioni di due particolari lunghezze d'onde, sottraendo le quali alla luce solare, gli atomi della cromosfera vengono appunto mantenuti in equilibrio. È bensí vero che, dopo un centomilionesimo di secondo, l'atomo ricade e deve cedere quanto ha assorbito; ma quando emette di nuovo la luce, la invia sia verso l'interno sia verso l'esterno del globo solare, sicché il flusso dirigendosi verso l'esterno perde piú di quanto non guadagni; e quindi, allorché osserviamo il *Sole* attraverso il suo mantello di calcio, lo spettro, in corrispondenza delle due anzi dette lunghezze d'onda, manifesta lacune o righe oscure, indicate colle lettere *H* e *K*. Esse non sono perfettamente nere, ed importa misurarne la luce residua al loro centro, giacché sappiamo che la sua intensità è giusto sufficiente per mantenere a galla gli atomi di calcio, pur sottoposti alla gravitazione solare. Quando poi si dirige verso l'esterno, la luce è affievolita a tal punto da non poter piú, né sostenere gli atomi né subire altre perdite: perciò emerge tale e quale nello spazio intorno, con questa intensità limite. Le misure forniscono i dati numerici occorrenti pel calcolo delle costanti dell'atomo di calcio, compresovi l'anzi detto periodo di rilassamento.

Gli atomi che si trovano nella regione superiore della cromosfera riposano sulla luce indebolita, che ha attraversato lo schermo sottostante, mentre la luce solare diretta li proietterebbe lontano. Il MILNE ne ha dedotto una conseguenza, che forse potrà avere un'applicazione pratica nel fenomeno di esplosione delle ''stelle nuove'' o *novae*, ed in ogni caso è di suggestivo interesse. Per effetto del fenomeno DOPPLER, un atomo in movimento ed un atomo stazionario assorbono una differente lunghezza d'onda, e però, ove un atomo, per una qualsiasi causa, si muova allontanandosi dal *Sole*, dovrà cercare sostegno nella luce di lunghezza d'onda di poco differente da quella che subisce l'assorbimento massimo. Per altro, questa luce, essendo piú intensa di quella che produce l'equilibrio, farà recedere l'atomo ancor piú rapidamente, e l'assorbimento proprio dell'atomo si distinguerà sempre meglio dall'assorbimento dello schermo inferiore.

Per usare un linguaggio metaforico, diremo che l'atomo, trovandosi in uno stato d'equilibrio instabile sul vertice della riga di assorbimento, è soggetto a ruzzolare lateralmente nella piena luce solare. La velocità dell'atomo sembra vada crescendo, fino a quando l'atomo medesimo riesce ad arrampicarsi a una riga d'assorbimento adiacente (magari dovuta ad altro elemento); ma se questa non può essere sormontata, perché troppo intensa, l'atomo resterà per via, mentre la velocità si stabilizzerà ad un dato valore. Queste ultime conclusioni sono forse un poco azzardate, ma in ogni modo il ragionamento indica la possibilità di fuga del calcio nello spazio circostante.

La teoria di MILNE permette di calcolare il peso totale della cromosfera di calcio, ed è stata cosí trovata la cifra di trecento milioni di tonnellate, che davvero stupisce possa derivare da calcoli astronomici, se non raggiunge neppure il peso delle merci trasportate in un anno dalle ferrovie inglesi. Immaginiamo di leggeri il disappunto degli osservatori solari, che hanno dovuto lavorare tanto per cosí poco, credendo magari ad una mistificazione. Ma, invero, nulla è trascurabile nelle scienze, e l'astronomia non diviene avara di insegnamenti se, una volta tanto, le accade di discendere fino ai numeri che son piú consueti ai mortali.

## LA NOVELLA DI BETELGEUSE

Questa novella ci porta un po' lontano dagli atomi e non s'inquadra perfettamente col programma delle nostre conferenze. Ma abbiamo avuto l'occasione di citare *Betelgeuse* (Pagg. 60, 78) come un esempio tipico di stella di dimensioni gigantesche e di bassa densità; e, di piú, quanto ne diremo cade opportuno accanto ad altre questioni qui trattate.

Nessuna stella ha un disco tanto grande quanto basta per farsi cogliere dai telescopi attuali, e tuttavia una lente od uno specchio di sei metri d'apertura all'incirca ci mostrerebbero, non già tutto, ma appena qualche traccia del disco stellare piú grande. Ammettendo per un istante di possedere uno strumento di quest'ordine di grandezza, quale stella ap-

pagherà meglio la nostra speranza di vederne il disco? Poiché è la piú brillante di tutto il cielo, *Sirio* ci viene alla mente prima d'ogni altra; ma se la superficie incandescente irradia una luce intensissima, non è detto che le dimensioni della stella siano quali noi vogliamo. Ne occorre certo una, che sia pur brillante, ma abbia la superficie in uno stato di piú tenue luminosità; che debba, cioè, il suo elevato splendore apparente all'ampia superficie emettente: una stella ad un tempo rossa e brillante. *Betelgeuse* sembra soddisfi meglio a queste condizioni: è la piú brillante delle due formanti le spalle di *Orione*, è la sola rossa visibile nella costellazione e rivaleggia con un'altra o due, come *Antares* *a* (*Scorpi*), che le potremmo preferire; ma non cadremo in grave errore mirando il nostro ideale strumento su *Betelgeuse*, colla fiducia di scoprire il disco stellare piú grande del cielo, od almeno uno dei maggiori.

Il lettore avrà badato al nessun conto che s'è tenuto delle distanze di queste stelle. Di fatto, la distanza qui conta poco perché non andiamo in cerca della stella cui corrispondano le maggiori dimensioni effettive, bensí di quella che abbia il disco apparente[1] piú ampio; che, cioè, occupi nel cielo la superficie piú estesa. Se la nostra distanza dal *Sole*

---

[1] Sembrerebbe poco accorto l'uso del termine "apparente" per indicare qualche cosa che, data la sua esiguità dimensionale, non può essere veduta. Ma il nostro telescopio, appunto perché immaginario, ci permette di vedere il disco, e però il termine ha senso anche nell'uso che qui gli viene attribuito.

fosse doppia di quella reale, riceveremmo dall'astro solo un quarto della luce che effettivamente percepiamo; ma le dimensioni lineari del *Sole* apparirebbero in tal caso dimezzate, e la superficie ridotta ad un quarto; cioè: la distanza non altera la quantità di luce emessa dall'unità di superficie apparente del disco. Se l'astro s'allontanasse a distanze via via crescenti, il suo disco apparirebbe sempre piú piccolo, ma lo splendore non sarebbe per ciò meno intenso, fino a quando, cresciuta ancor piú la distanza, non riuscisse anche impossibile distinguere la forma.

Sappiamo dall'analisi spettrale, che la temperatura superficiale della stella *Betelgeuse* si aggira intorno ai tremila gradi; si tratta invero di un grado di calore che non è sconosciuto ai nostri laboratori, ed anzi in parte la teoria ed in parte l'esperienza ci dicono qual è il potere emissivo d'una superficie che si trova in quello stato. Cosí non resta difficoltà a calcolare le dimensioni della superficie che deve occupare nel cielo la stella *Betelgeuse*, perché il prodotto della sua area per il potere raggiante equivalga numericamente alla luminosità della stella quale viene da noi osservata. Si trova, cosí, che le dimensioni apparenti di *Betelgeuse* sono molto esigue; pari, cioè, a quelle d'un soldino alla distanza di ottanta chilometri o — per usare una misura piú scientifica — il diametro di *Betelgeuse* è, secondo questi calcoli, di 0″.051; dunque, poco piú di cinque centesimi di secondo d'arco.

Nessun telescopio, fra quelli esistenti, può farci vedere un disco tanto piccolo. Ma consideriamo bre-

vemente in qual modo un telescopio forma l'immagine; in ispecie come riproduce i particolari ed i contrasti luminosi, che rivelano se abbiamo che fare con un disco oppure con una stella doppia, e non con la macchia prodotta da un semplice punto. Questa proprietà ottica è denominata ''potere risolvente'' e, poiché dipende non dalla potenza dell'ingrandimento ma sovrattutto dall'apertura, il limite di esso risulta proprio dalle dimensioni dell'obbiettivo telescopico. Per la formazione di un'immagine ben definita, occorre che il telescopio, non solo convogli la luce là dove ne occorre, ma anche dia luogo alla oscurità là dove ha da esservene. Quest'ultima operazione, appunto, è la piú difficile, giacché le onde luminose tendono a disperdersi in tutte le direzioni, e lo strumento non può impedire che le piccole onde individuali vadano a smarrirsi nelle parti dell'immagine dove non hanno che fare. V'è tuttavia un rimedio, e cioè: che ad ogni piccola onda fuorviata se ne faccia seguire un'altra, lungo un percorso piú lungo o piú corto, in modo da farla arrivare in opposizione di fase rispetto alla prima, e cosí annullarne l'effetto. L'utilità della grande apertura dei telescopi va riferita proprio a ciò, che consente alle piccole onde individuali di seguire percorsi di diversissima lunghezza, sicché quelle provenienti da un lato dell'apertura possano essere ritardate, rispetto a quelle provenienti da altre parti, e quindi annullarsi a vicenda, pel fenomeno dell'interferenza. Un piccolo obbiettivo può dare della luce, ma non basta: ce ne vuole uno grande, per fare oscure le regioni dell'immagine che debbano essere tali.

Ci possiamo ora domandare se la consueta apertura circolare sia di necessità la piú conveniente, per consentire alle piccole onde individuali di percorrere cammini di differente lunghezza. Ebbene, poiché ogni divario da una forma simmetrica è destinato ad alterare, con ali e con frange, i contorni finiti dell'immagine, questa non rassomiglierà piú fedelmente all'oggetto osservato. Per altro, può darsi si riesca cosí a far risaltare meglio gli aspetti che a noi piú interessano, e, non facendo caso della discordanza fra l'immagine e l'oggetto, ci si possa accontentare di un'immagine alquanto diversa, la quale tuttavia indichi senz'equivoco il medesimo oggetto. In altri termini, non riuscendo a riprodurre un disco stellare, cerchiamo di riprodurre qualcosa che ce ne dia un'idea.

Riflettendo un poco, ci accorgiamo che è possibile trarre vantaggio dal coprire il centro dell'obbiettivo con un diaframma, e far uso, in tale modo, delle sole regioni laterali opposte; queste, consentendo la massima differenza di percorso delle onde, sono le piú adatte a fornire il contrasto oscuro, ch'è necessario a darci un'immagine con contorni definiti. Ma se il centro dell'obbiettivo non serve, perché spendere a costruirlo come le altre parti? Siamo condotti all'idea di usare due fenditure, separate ad alquanta distanza l'una dall'altra, e ciascuna munita d'una lente o di uno specchio di dimensioni relativamente ridotte; in altre parole, ad uno strumento simile al telemetro.

Nemmeno con questo strumento riusciamo a vedere i dischi stellari, e quando ci facciamo a guardare

l'immagine stellare, essa ci appare dapprima molto simile a quella che ci darebbe l'uso di una sola lente obbiettiva aperta: un disco ''spurio'', circondato da anelli di diffrazione. Ma poi, osservando attentamente, vediamo la stessa immagine attraversata da bande oscure e brillanti, che derivano dall'interferenza delle onde luminose provenienti dalle due fenditure. Al centro dell'immagine, le onde giungenti dalle due aperture, avendo seguíto percorsi simmetrici ed uguali, vanno a sovrapporsi le une colle altre, e dànno una banda brillante; invece, un poco a lato, per effetto dell'asimmetria, le onde giungono in tal modo che ad una cresta si sovrappone una gola; però si annullano, formando una banda oscura. La larghezza delle bande decresce, quando aumenta la distanza fra le due fenditure, ed è facile calcolarla, ove sia conosciuta questa distanza.

Ciascun punto del disco stellare dà origine ad una immagine di diffrazione con un sistema di bande del medesimo genere; ma, fintanto che il disco è esiguo, in rapporto ai minuti particolari dell'immagine di diffrazione, non si dà sensibile confusione in detti sistemi. Aumentando sempre piú la distanza tra le due fenditure, per ridurre cosí anche la larghezza delle bande, arriva il momento che le bande brillanti, relative ad una regione del disco, cadono sulle bande oscure di un'altra, e allora il sistema risultante si offusca. Quest'effetto vien calcolato *a priori* e si dimostra che, ad una data distanza delle fenditure, le bande spariscono tutte insieme, per riapparire ad una maggior distanza, prive tuttavia dell'originale nitidezza. La scomparsa completa si verifica allorché

il diametro del disco stellare è uguale ad una volta ed un quinto della larghezza delle bande (misurata fra il centro d'una banda brillante e il centro della successiva). Essa, come dicevamo, può essere calcolata quando sia nota la separazione delle due fenditure. Aggiungeremo, che le osservazioni relative a queste indagini vengono eseguite facendo scorrere le due fenditure, per allontanare l'una dall'altra fino alla effettiva scomparsa delle bande; misurata la distanza alla quale si son dovute portare le fenditure, è facile dedurre il diametro del disco, senza pur vederlo.

Il principio che inspira siffatto metodo può essere riassunto come segue. L'immagine d'un punto luminoso, quale vien data da un telescopio, non è un punto, ma una minuscola figura di diffrazione. Quindi, guardando un oggetto di dimensioni apprezzabili, poniamo un pianeta, la figura di diffrazione ne confonderà i particolari minuti. Se, invece, osserviamo una stella quasi puntiforme, è piú agevole e fecondo il ragionamento inverso: l'oggetto, non essendo un punto ideale, confonderà solo lievemente i particolari della figura di diffrazione, e non ce ne accorgeremo, se essa non conterrà particolari cosí minuti da esserne influenzati. *Betelgeuse,* a causa delle sue dimensioni finite, dovrebbe in teoria fornire una figura di diffrazione confusa; ma ciò in realtà non avviene perché il disco, e gli ordinari anelli di diffrazione prodotti dal piú grande telescopio oggi esistente, sono ancora molto grossolani. Un'immagine di diffrazione con particolari piú minuti può essere ottenuta facendo

uso di due aperture. Teoricamente, ove si aumenti la separazione delle due aperture, è possibile accrescere questi particolari quanto vogliamo; in pratica, la distanza dovrà essere aumentata, finché la figura di diffrazione non si mostri con particolari tanto minuti, che *Betelgeuse* riesca visibilmente a confonderli. Per un disco stellare piú piccolo, invece, l'effetto medesimo non si manifesterebbe fino a quando i particolari non diventassero, per effetto d'una maggiore separazione delle due aperture, ancor piú minuti.

Questo metodo è stato ideato dal Prof. MICHELSON molti anni fa, ma solo nel 1920 applicato in grande scala, col mezzo d'una trave metallica lunga sei metri e attaccata in direzione normale all'asse del riflettore di due metri e cinquanta d'apertura dell'Osservatorio di Monte Wilson. Dopo numerosi tentativi, PEASE e ANDERSON ottenevano la scomparsa delle bande brillanti ed oscure di *Betelgeuse* corrispondentemente alla distanza di tre metri fra le due fenditure; da cui si deduceva il valore del diametro apparente del medesimo astro in 0''045, molto vicino a quello previsto (Pag. 97). In piú di *Betelgeuse,* solo cinque stelle hanno dischi apparenti tali da potersi misurare con quell'interferometro, e neppure l'altro di quindici metri, che sta per essere montato, riuscirà adatto alle misure analoghe che vogliano farsi sulla maggior parte delle stelle. È nostra opinione che il metodo di calcolo sopra esposto possa valere a darci misure esatte dei diametri stellari, ed ha intanto tutta la nostra fiducia; ma non per ciò appare superflua la

sua conferma mediante il metodo diretto di A. A. MICHELSON.

Se, conosciuto il diametro apparente, vogliamo arrivare alle dimensioni effettive d'una stella, fa d'uopo conoscerne la distanza. Quella di *Betelgeuse*, che è una stella piuttosto lontana, non può essere misurata con rigore; ma l'incertezza del calcolo non cambia l'ordine di grandezza, e si trova che l'astro ha un diametro effettivo all'incirca di cinquecento milioni di chilometri, sicché conterrebbe non solo l'intera orbita della *Terra* ma forse anche quella di *Marte*. Il suo volume, poi, è press'a poco pari a cinquanta milioni di volte quello del *Sole*.

A riguardo della massa della medesima stella rileveremo la mancanza d'un metodo di calcolo diretto, ché *Betelgeuse* non ha, come *Sirio*, una compagna che ne turbi il movimento; ma sovviene la relazione fra luminosità e massa, indicata nella figura 13, per stimarla pari a 35 volte quella del *Sole*. Cosí, se la cifra è esatta, *Betelgeuse* è una delle stelle di massa maggiore; ma, naturalmente, non proporzionata al suo volume; giacché la densità media dell'astro è all'incirca un milionesimo della densità dell'acqua; cioè, press'a poco un millesimo di quella dell'aria [1].

Se pure non possedessimo i fondamenti di una

---

[1] Densità inferiori sono state determinate, per alcune stelle variabili del tipo di *Algol*, con un metodo molto diverso; e, ancora con un altro metodo, per alcune *Cefeidi*. Si dànno anche numerosi altri esempi di stelle con volume comparabile a quello di *Betelgeuse*.

teoria, o d'una analogia, per la valutazione delle masse, arriveremmo anche altrimenti a concludere che *Betelgeuse* è meno densa del *Sole*. Secondo la moderna teoria della gravitazione, una stella delle dimensioni di *Betelgeuse* e della densità media del *Sole* avrebbe queste notevoli proprietà:

1) In conseguenza della forte intensità del suo campo gravitazionale, la luce non si potrebbe propagare, e tutti i raggi emessi dalla stella ricadrebbero su essa a causa del proprio peso;

2) L'effetto EINSTEIN, di spostamento delle righe spettrali (che già fu ricordato per la misura della densità della compagna di *Sirio*), avrebbe tal valore da portare l'intero spettro di là da quello visibile;

3) La massa incurva lo spazio, e in questo caso, la curvatura sarebbe cosí notevole, che lo spazio si chiuderebbe intorno alla stella, per lasciarne fuori tutti noi, relegandoci in nessun luogo.

A prescindere da quest'ultima considerazione, è veramente un peccato che la densità di *Betelgeuse* si mantenga cosí bassa.

Giunti alla fine di questa conferenza, appare chiaro perché le stelle possano anche annoverarsi come una succursale importantissima del laboratorio di fisica: una succursale dove è possibile lo studio, nelle condizioni piú varie, delle proprietà della materia ad elevatissime temperature. Noi astronomi propendiamo naturalmente a studiare i legami in modo un poco differente, per considerare il labora-

torio di fisica quale una stazione, annessa alle stelle, per le indagini sulle basse temperature, le quali sono proprio quelle che, a nostro parere, bisognerebbe porre fra le temperature anormali.

Ove se ne tolga la nebulosità intersiderale in cui regna la temperatura, invero moderata, di circa quindicimila gradi, crediamo giustificata l'ipotesi che nei nove decimi della materia dell'Universo regnino temperature di piú di un milione di gradi. Nelle condizioni ordinarie — e si capirà qual senso qui voglia la parola — la materia è dotata di proprietà molto semplici. Tuttavia esistono nell'Universo regioni eccezionali a temperature poco lontane dallo zero assoluto; dove, le proprietà fisiche della materia si complicano, e gli ioni si avvolgono di sistemi elettronici completi, diventando simili agli atomi conosciuti dall'esperienza terrestre. Il nostro pianeta è appunto uno di questi angoli gelidi, in cui sorgono le piú strane complicazioni. E forse la piú strana è questa: che alcune delle sue complesse strutture possano venire investigate per speculare intorno al senso dell'intera creazione.

## III

# L'ETÀ DELLE STELLE

Il periodo della *Delta di Cefeo* – Le variabili *Cefeidi* e le distanze degli ammassi stellari – L'età della *Terra* e del *Sole* – Energia e massa – L'energia interna degli atomi che costituiscono le stelle – Annichilazione della materia – Trasmutazione degli elementi – Il corso evolutivo e l'età delle stelle – Stelle giganti e stelle nane; stelle diffuse e stelle dense – La perdita di massa – Le pulsazioni delle stelle variabili – Verso nuove indagini.

Abbiamo visto fin dalla prima conferenza che, nella scala delle dimensioni naturali, l'uomo sta press'a poco nel punto intermedio fra l'atomo e la stella. Dove lo porremo, nella scala del tempo? In questa, la vita umana trova il suo posto forse giusto ad uguale distanza fra il punto che segna la vita d'un atomo eccitato (Pagg. 92-3) e quello che spetta alla vita d'una stella. Ma, pur non potendosi riconoscere molta esattezza nelle cifre che vengono attribuite attualmente alla vita degli astri, il confronto dev'essere un poco modificato per chi aspira ad una maggiore precisione. Diremo quindi che, in rapporto alla massa, l'uomo è molto piú vicino all'atomo e piú lontano dalla stella, e che l'ippopotamo vanta maggiori diritti all'occupazione del punto interme-

dio. In rapporto al tempo, invece, se la vita media dell'uomo raggiunge i settant'anni, siamo piú vicini alla stelle e non all'altro estremo; e dobbiamo cedere il posto intermedio alla farfalla.

La fantasia che stabilisce questi paragoni racchiude, nondimeno, un profondo significato morale. Indagando l'eternità, ci verrà infatti di considerare tempi che colpiscono la nostra immaginazione; vedremo, tuttavia, che l'enorme durata del corso evolutivo delle stelle è, rispetto all'età dell'uomo, meno lontana della minuscola scala che misura nel tempo i fenomeni atomici.

Progredendo verso la conoscenza della ''età delle stelle'', incontreremo problemi che ci tratterranno per via; né le soste saranno inutili.

## STELLE PULSANTI

La stella δ *Cephei* (la *Delta di Cefeo*) appartiene alla classe delle stelle variabili e, al pari di *Algol*, ci invia un messaggio per mezzo della sua luce variabile; ma, quando lo traduciamo, appare affatto diverso da quello partente dalla β *Persei* (*Algol*).

Dobbiamo avvertire subito, che il messaggio della δ *Cephei* è stato interpretato in varî modi. Qui per altro non è opportuno discutere la questione, e neppure spiegare perché, scartate le altre interpretazioni, propendiamo per quella suggerita da PLUMMER e da SHAPLEY. Resa molto convincente in ispecie

per merito di quest'ultimo, essa trae conforto — sebbene meno di quanto occorrerebbe per tener lontano ogni dubbio — anche dai successivi sviluppi; e ora l'andremo esponendo sommariamente.

Si è veduto che *Algol* risulta costituita di due stelle fra loro vicinissime, che si ecclissano a vicenda. La δ *Cephei* è invece una stella senza compagna e pulsante: un globo che si dilata e si contrae simmetricamente, con un periodo regolare di cinque giorni e un terzo. La sua massa viene però sottoposta ad ampie variazioni di temperatura e di pressione, e quindi la luce emessa cresce e poi diminuisce d'intensità, variando in pari tempo di colore.

Qui non si può parlare, come per *Algol*, di ecclissi; né i segnali luminosi consistono di ''punti'' e ''linee'': la variazione di colore annunzia cosí che v'è un effettivo mutamento delle condizioni fisiche della sorgente luminosa. Le prime interpretazioni, presupponendo l'esistenza di due stelle, volevano collegare questi mutamenti fisici con un moto orbitale. Immaginavano all'uopo che la componente maggiore descrivesse la propria orbita in un mezzo resistente, il quale ne riscaldasse per attrito la faccia anteriore, sicché lo splendore dovesse apparire diverso, secondo che la stella si mostrasse dalla faccia anteriore piú calda, o dalla posteriore. Ma l'interpretazione orbitale tramontava quando si riusciva a dimostrare che, in quello spazio, non ci sarebbe stato assolutamente posto per due stelle. L'ipotetica orbita era stata calcolata col noto metodo spettroscopico, inteso a misurare le velocità di avvicinamento e di allontanamento; e, migliorate

le nostre conoscenze sulle reali dimensioni stellari, col sussidio del calcolo e, per alcuni astri, mercé rilievi diretti, era apparso — considerata l'impossibile sproporzione fra il ragguardevole volume della stella e la sua piccola orbita — che la supposta compagna avrebbe dovuto trovarsi dentro la stella principale. Dimostrazione per assurdo, quindi, con cui veniva sancita l'illegittimità dell'ipotesi che la δ *Cephei* fosse una stella doppia. Occorreva, però, trovare una diversa interpretazione del fenomeno.

Quanto veniva creduto avvicinamento od allontanamento di tutta la stella non era, in verità, se non l'avvicinamento o l'allontanamento della sua superficie, che si sollevava o si abbassava ad ogni pulsazione. E poiché le stelle variabili del tipo della δ *Cephei* sono astri diffusissimi, di dimensioni maggiori del *Sole*, e lo spostamento totale misurato è appena una frazione del loro raggio, ne consegue che non è necessario invocare uno spostamento generale (moto orbitale) di tutta la stella: le nostre misure seguono le oscillazioni della faccia stellare rivolta verso noi.

Intanto, dal fatto che la δ *Cephei* è una stella semplice, e non invece una stella binaria, deriva immediatamente che il periodo di cinque giorni ed un terzo è una proprietà intrinseca della stella e può, di conseguenza, offrirci il mezzo per conoscere il suo stato fisico. Infatti, codesto periodo — la distinzione è importantissima — è libero, indipendente da cause esterne: non imposto da cause che risiedano fuori della stella. Consideriamo, a mo'

d'esempio, il numero delle macchie solari. Esso varia fra un massimo ed un minimo, e poscia risale ad un massimo, in un periodo che dura all'incirca undici anni e sei mesi. Ebbene, benché ignoriamo ancora la causa di questa variazione, possiamo già ammettere che il medesimo periodo sia una caratteristica dello stato attuale del *Sole*, soggetta a mutare insieme col medesimo stato. Vi fu tuttavia un tempo che venne creduta possibile un'influenza del moto di rivoluzione di *Giove* — di durata all'incirca uguale — sulla periodicità delle macchie solari. Ora, se quest'ipotesi fosse stata confermata, il periodo di undici anni e mezzo avrebbe perduto il suo carattere d'indipendenza: sarebbe stato l'effetto d'una causa esterna, e nulla avrebbe potuto piú dire delle proprietà intrinseche dell'astro. Convinti che il periodo luminoso della δ *Cephei* è un periodo libero, appartenente ad una stella semplice, quasi al modo che una data nota appartiene ad un determinato diapason, è chiaro che lo potremo addurre a testimoniarci la costanza (o quel che sia) dello stato fisico della stella.

Nell'astronomia stellare, per le misure che concernano le parallassi, o i raggi, o le masse, o gli splendori assoluti, od altro, l'approssimazione spinta ad un errore che si aggiri intorno al cinque per cento del valore cercato è quanto mai soddisfacente; ma la misura dei periodi vien spinta ad un'approssimazione molto maggiore. Reputiamo che la quantità scientifica piú rigorosamente nota, escluse quelle delle matematiche pure, sia il periodo medio lunare, determinato con un numero costituito da dodici cifre signi-

ficative, mentre le misure colle quali viene espresso il periodo della δ *Cephei* ne hanno almeno sei.

Associando alle condizioni intrinseche d'una stella un periodo indicato dall'osservazione, veniamo a procurarci un indice, che è sensibilissimo anche in rapporto alle variazioni di stato estremamente piccole. Si comprenderà ora perché, volendo arrivare all'età delle stelle, abbiamo voluto passare per le variabili *Cefeidi* le quali sembrano finora le sole stelle dotate d'un indice capace di soddisfare la nostra speranza di poter stabilire il corso dell'evoluzione stellare. Noi crediamo che la δ *Cephei,* al pari delle altre stelle, provenga dalla condensazione d'una nebulosa e che tanto la condensazione quanto la contrazione continuino tuttora. Nessuno si ripromettere-rebbe certo di cogliere la contrazione per mezzo delle nostre grossolane misure del raggio, nemmeno se si riferissero ad esperienze svolte in un centinaio d'anni; ma, di fatto, l'evoluzione dev'essere ben lenta, se il periodo intrinseco, misurabile coll'approssimazione d'un decimilionesimo del suo valore, non palesa in un secolo alcuna variazione.

Qual è la natura di questo periodo intrinseco? Invero non occorre preoccuparsi di conoscerla. Se una stella si contrae, dovrà in pari tempo modificarsi anche il periodo di pulsazione, il periodo di rotazione, o qualsiasi altro periodo libero, che si trovi ad esserle associato. Poco importa seguire questa o quella interpretazione del messaggio della δ *Cephei*: pur modificando opportunamente i termini del nostro ragionamento, il risultato conclusivo, a riguardo della velocità di evoluzione, rimar-

rebbe tuttavia il medesimo. A meno che non dessimo di nuovo credito all'ipotesi che faceva della δ *Cephei* una stella binaria, e quindi il periodo venisse a perdere la sua caratteristica indipendenza dalle cause esterne. Ma tale eventualità è forse impossibile, ché — pensiamo — nessuno oggi si farebbe a sostenere codesta ipotesi.

Non deve stupire che le stelle pulsanti ci interessino tanto. Le stelle ordinarie, sia pure colla dovuta deferenza, vanno considerate quali oggetti esposti nelle vetrine d'un museo: per farli reagire dobbiamo frugarvi dentro colle dita. Le stelle pulsanti, invece, sono privilegiati esemplari dello *''Science Museum''*: per vederne funzionare il meccanismo, basta premere un bottone. E meglio non potremmo informarci del loro stato, se non osservando — come infatti pare sia possibile — il meccanismo delle stelle che palpitano cosí intensamente.

La teoria della stella invariabile, da noi esposta nella prima conferenza, può essere estesa alle stelle pulsanti, e possiamo calcolare il libero periodo di pulsazione di queste, ove se ne conoscano e la massa e la densità. Si ricorderà che, calcolando l'emissione calorifica o lo splendore, e fattone oggetto di confronto coll'osservazione, la validità della teoria medesima è apparsa soddisfacentemente dimostrata. Ma possiamo ottenere anche un'altra prova, calcolando il periodo di pulsazione e riferendolo quindi all'osservazione; tuttavia, per effetto della mancanza di sicuri ragguagli su una certa costante della materia stellare, i nostri calcoli acquistano una qualche incertezza rappresentata da un fattore prossimo a 2:

cioè i nostri calcoli individuano non uno ma due periodi, e l'uno doppio dell'altro, fra i quali è molto probabile si trovi il periodo vero. L'osservazione ne dà un'eccellente conferma. Le variabili *Cefeidi* cosí saggiate sono sedici e i loro periodi — compresi fra le 13 ore e i 35 giorni — si accordano appunto coi valori calcolati, entro i limiti d'esattezza previsti. Benché meno direttamente, una conferma analoga è data dalla figura 13, dove i quadretti, che rappresentano appunto le *Cefeidi*, seguono fedelmente il profilo della curva teorica.

## LA CEFEIDE: "CANDELA-CAMPIONE"

Le variabili *Cefeidi* del medesimo periodo sono tutte rassomigliantissime; quindi una *Cefeide* del periodo di 5 giorni ed un terzo, dovunque scoperta, va praticamente considerata alla stregua d'una copia della δ *Cephei*: in particolar modo, come una stella di uguale splendore assoluto. Ed è un fenomeno osservato, che la teoria non aveva comunque preveduto.

Sappiamo già che lo splendore dipende sovrattutto dalla massa, e il periodo dalla densità: ciò vale quanto dire che la visibile relazione fra lo splendore ed il periodo contiene anche una implicita relazione fra la massa e la densità: probabilmente questa: che per una data massa esiste una particolare densità — una tappa nel corso della conden-

sazione stellare — alla quale la stella sarebbe adatta a pulsare, mentre per le altre densità splenderebbe uniformemente. Per questa proprietà, la *Cefeide* rende all'astronomia servizi incomparabili; le fornisce, infatti, una "candela-campione": una sorgente luminosa di intensità nota.

Di regola, osservando una stella non ci riesce di valutarne il vero splendore, giacché se, ad esempio, appare debole, ciò può significare, o che l'astro è veramente tale, o che è molto lontano. Cosí da una nave, nelle chiare notti senza luna, è possibile vedere numerose luci, senza tuttavia distinguere con precisione né la distanza né lo splendore effettivo di esse. Anzi, l'errore che si può commettere, affidandoci alla vista per la stima dello splendore, raggiunge qualcosa come la proporzione fra uno ed un quintilione, se accade di scambiare la stella *Arturo* (*α Bootis*) col fanale al trinchetto d'una nave immobile! Ma ove fra tante luci se ne scorga una, che ora splenda ed ora si oscuri a periodi regolari d'un certo numero di secondi, è facile affermare a quale faro appartenga e, consultato il portolano, sapere quante migliaia di candele compongano la sua intensità. Il passo è breve per arrivare alla stima della distanza, quando, naturalmente, l'atmosfera è tersa.

Della maggior parte delle luci che vediamo osservando il cielo, non sappiamo parimente indicare né la distanza, né lo splendore. Anche colle piú rigorose misure di parallasse riusciamo ad individuare soltanto poche luci fra le piú vicine. Ma scorgendone una, che scintilla variamente al modo delle *Cefeidi*, con un periodo di 5 giorni ed un terzo,

possiamo asserire subito che essa è una replica della δ *Cephei* con un potere luminoso settecento volte maggiore del *Sole*. Se, invece, il periodo consta d'un differente numero di giorni, possiamo assegnare alla stella l'intensità luminosa, in rapporto al *Sole*, che le corrisponde per quel periodo. Con questo dato si può allora stimare la distanza. Infatti, lo splendore apparente, che dipende dallo splendore effettivo e dalla distanza, viene misurato coll'osservazione, e basta un semplice calcolo per valutare la distanza a cui deve trovarsi una sorgente luminosa settecento volte piú intensa del *Sole*, affinché il suo splendore apparente sia quello appunto misurato. V'è tuttavia da domandarsi quanta luce venga arrestata dalla nebbia. Dalle esaurienti discussioni fatte al proposito è apparso che, nonostante la nube cosmica esistente nello spazio interstellare, la luce degli astri non subisce d'ordinario — lungo il cammino che percorre per arrivare a noi — né assorbimento né dispersione apprezzabili.

Assumendo le *Cefeidi* (Fig. 22) come candele-campione, giungiamo a calcolare distanze stellari, che sono molto di là da quelle calcolate coi metodi precedenti. Ove riguardasse le sole distanze delle *Cefeidi*, la scoperta della caratteristica proprietà di tali astri non basterebbe a giustificare quella importanza che vi si annette; in verità, apre la strada a ben piú notevoli cognizioni.

La figura 23 riproduce la fotografia eseguita nel Reale Osservatorio del Capo di Buona Speranza, d'un notissimo ammasso stellare, l'ω *del Centauro*, dove fra migliaia di stelle sono state

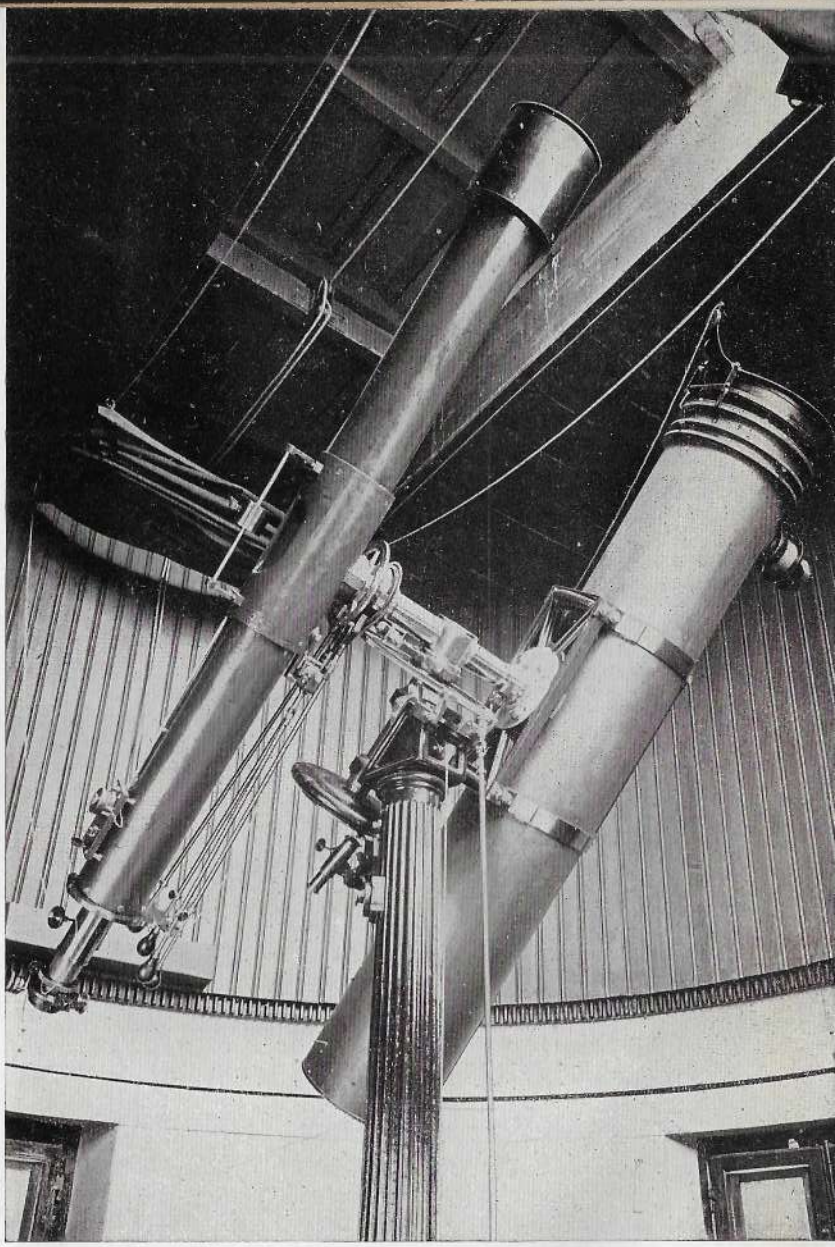


Fig. 22. — Riflettore prismatico dell'Osservatorio di Arcetri col quale si compiono ricerche sistematiche sulle Cefeidi. A sinistra di chi guarda, è il cannocchiale visuale; a destra, il riflettore con due prismi di 30 centimetri d'apertura.

Fig. 23. — Ammasso stellare $\omega$ *Centauri*,
fotografato all'Osservatorio Reale del Capo di Buona Speranza.

scoperte non meno di settantasei *Cefeidi*, ciascuna delle quali serve, non solo per la misura della propria distanza ma anche di quella dell'intero ammasso. I risultati delle settantasei misurazioni sono tutti pressocché equivalenti, con un divario medio, dall'uno all'altro, inferiore al cinque per cento; e, appunto in tal modo, lo SHAPLEY ha indicato la distanza dell'ammasso in ventimila anni-luce. Cioè, i messaggi luminosi che ci giungono oggi dall'ammasso, son partiti ventimila anni or sono! [1]

L'astronomo, molto piú d'ogni altro "fedele della scienza", sa riconoscere il vantaggio che gli viene dal non essere troppo vicino agli oggetti che studia. In rapporto a ciò, gli cadono a distanza favorevole le stelle piú prossime, ma è tuttavia imbarazzante trovarsi proprio in mezzo ad esse, giacché ciascuna dovrebbe essere considerata a sé e, per calcolarne la distanza, ci vorrebbero faticose misure e quindi un tempo molto lungo. Invece, allorché riusciamo a misurare la distanza d'un lontano ammasso, veniamo senz'altro a riconoscere la distanza di parecchie migliaia di stelle, colla possibilità di dedurre dalla loro grandezza apparente la grandezza assoluta, e di raccogliere statistiche e relazioni fra la grandezza assoluta ed il colore.

Prima ancora di dirci della loro distanza, le stelle che compongono l'ammasso ci parlano con abbon-

---

[1] A mo' di paragone, ricordiamo che la stella fissa piú vicina dista da noi quattro anni-luce; e, colla sola eccezione degli ammassi (e delle nebulose), raramente abbiamo da fare con distanze astronomiche che superino i duemila anni-luce.

dante eloquenza, come non saprebbero se fossero un poco meno lontane. Possiamo osservare che lo splendore delle *Cefeidi* è molto maggiore di quello medio, e superato solo da un numero relativamente scarso d'altre stelle; possiamo accertare che quando cresce lo splendore cresce anche il loro periodo; scoprire, che le piú brillanti di tutte sono rosse [1]; e cosí via. Ma ogni medaglia ha il suo rovescio: i minuscoli punti luminosi d'un ammasso lontano non consentono né quelle misurazioni né quell'analisi che sole potrebbero farci prescindere dalle stelle piú vicine. È tuttavia innegabile che per talune ricerche astronomiche la lontananza abbia i suoi vantaggi, e per questo possiamo volgerci utilmente dalle stelle piú vicine allo studio di oggetti distanti cinquantamila anni-luce.

Gli ammassi globulari finora noti sono all'incirca ottanta, a distanze variamente distribuite fra i venti e i duecentomila anni-luce. V'è nient'altro che sia ancora piú lontano? Secondo un'opinione invero non recente, le nebulose spirali [2], che sembrano numerosissime, sarebbero esterne al nostro sistema stellare, e costituirebbero degli ''universi-insulari'' (Pagg. 190-1). Or-

---

[1] Non si può essere tuttavia certi che quant'è vero per le stelle di un ammasso valga altresí per le stelle in genere; ed invero le nostre cognizioni sulle stelle piú prossime — arretrate rispetto a quelle concernenti le stelle degli ammassi — non sono in perfetto accordo con tale relazione fra il colore e lo splendore.

[2] Le nebulose sono di differenti specie; ma soltanto le nebulose cosí dette " spirali " sono verosimilmente esterne al nostro sistema stellare.

bene, le prove che se ne dànno, cresciute di numero e di autorevolezza, vanno oggi considerate veramente decisive. Nel 1924 HUBBLE scopriva un certo numero di variabili *Cefeidi* nella nebulosa di *Andromeda*, che è certamente la maggiore nebulosa spirale, e forse delle piú prossime. Dopo averne misurato i periodi, codeste stelle furon fatte servire — candele-campione quali sono — per la determinazione della distanza della nebulosa. E poiché la loro grandezza apparente era molto piú debole di quella delle *Cefeidi* di ugual periodo appartenenti agli ammassi globulari, bisognava dedurre che fossero anche piú remote. In seguito HUBBLE ha potuto trovare, allo stesso modo, la distanza d'una o due altre spirali.

La nebulosa d'*Andromeda* è visibile ad occhio nudo, ed appare come una pallida nube luminosa: osservandola, risuscitiamo i tempi di novecentomila anni fa.

## L'IPOTESI DELLA CONTRAZIONE

Astronomi e non astronomi si sono fatti spesso a studiare e discutere il problema inteso a riconoscere quale perenne sorgente d'energia alimenti l'emissione luminosa e calorifica del *Sole*.

Nel secolo scorso, HELMHOLTZ e KELVIN dimostravano che poteva esser data ragione del calore solare postulando la progressiva contrazione dell'astro, cioè coll'avvicinamento o la caduta della materia solare

verso il centro: ipotesi che corrispondeva ad ammettere la provenienza dell'energia calorifica, di cui dispone il *Sole*, dalla trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale. Non conoscendo altro fenomeno nel quale potere identificare il mezzo di produzione d'una cosí enorme quantità d'energia, l'ipotesi della contrazione sembrava l'unica plausibile. Ma bisogna dire che la provvista d'energia ottenibile in tal modo non è illimitata quanto occorre, e che con quell'ipotesi non si riesce ad assegnare al *Sole* un'età di piú di venti milioni di anni. Età brevissima, anche al tempo cui ci riferiamo la consideravano inadeguata; ciò nondimeno KELVIN la indicava ai geologi ed ai biologi, come quella in cui doveva farsi contenere la storia della *Terra*.

Ai primi del 1900, la teoria della contrazione veniva ammessa generalmente e, caso strano, non meno generalmente quasi ignorata. Sicché, pochissimi si attentavano a negarla, ma crediamo che nessuno, tornandogli comodo, esitasse a collocare l'inizio della storia della *Terra* e della *Luna* in un'epoca piú antica di quella presunta per la formazione del sistema solare. Insomma, l'êra alla quale, secondo KELVIN, doveva farsi corrispondere la creazione del mondo non era piú rispettata di quella dell'Arcivescovo USSHER [1].

Le serie conseguenze dell'ipotesi di cui trattiamo assumono un maggior peso in rapporto alle stelle

---

[1] Secondo il quale, la creazione avrebbe avuto luogo all'incirca quattro mila anni prima della venuta di CRISTO (*C*).

Fig. 24. — La nebulosa "a filamento" o "a rete" nella costellazione del Cigno.
(*Monte Wilson*)

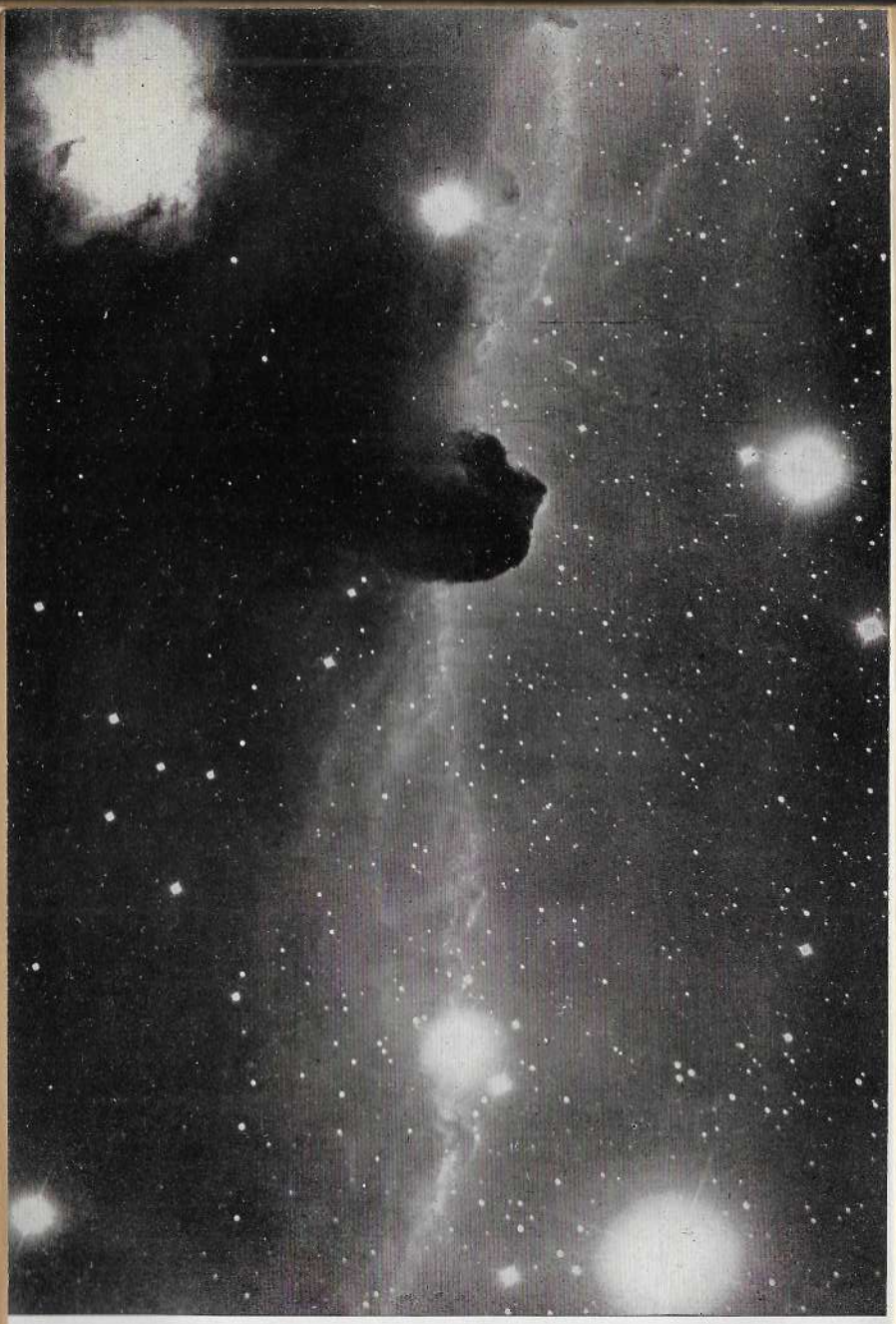


Fig. 25. — La " testa di cavallo " nella Grande Nebulosa di Orione.
(*Monte Wilson*)

diffuse di elevato splendore, a tal segno prodighe della loro energia da dissiparla cento o mille volte piú rapidamente del *Sole*. Il parsimonioso astro, secondo la medesima ipotesi, potrebbe essersi nutrito per venti milioni di anni a spese dell'energia raccolta colla propria contrazione; le stelle anzi dette, e però la maggior parte di quelle visibili ad occhio nudo, per appena centomila anni. Nessuno oserà certo credere che queste stelle si siano formate cento mila anni or sono; che il primo abitante terrestre sia nato quando esse non risplendevano ancora; che, infine, le stelle della nebulosa di *Andromeda* abbiano iniziato il loro moto da un tempo molto e molto piú breve di quello che ci vuole perché i loro raggi arrivino sino a noi.

Ma, se è imbarazzante avere da fare con cosí ristretta scala dei tempi, e duole il rifiuto di idee ed interpretazioni le quali sarebbero altrimenti ammissibili e suggestive, importa tuttavia rilevare che altra cosa è produrre una prova decisiva contro la legittimità della medesima scala. Non crediamo, per altro, che gli astronomi avessero nel loro campo un mezzo per combattere direttamente l'ipotesi HELMHOLTZ-KELVIN, prima di ottenerlo dalle *Cefeidi*.

Vediamo un po' che cosa dicono le cifre. La emissione calorifica della δ *Cephei* è almeno settecento volte piú intensa di quella solare. Conoscendo la massa ed il raggio della stella, è facile calcolare la contrazione che dovrebbe subire il raggio nel fluire del tempo per produrre tanta quantità di calore: un quarantamillesimo all'anno. Siccome la δ *Cephei*

fu osservata la prima volta accuratamente nel 1785, se l'ipotesi della contrazione fosse giusta, durante il tempo da allora trascorso il raggio della stella avrebbe dovuto contrarsi d'un trecentesimo. Il periodo di pulsazione della *Cefeide* costituisce, come abbiamo detto, un indice sensibilissimo d'ogni eventuale variazione dell'astro: variazioni dimensionali di quest'ordine non potrebbero però lasciare invariato il periodo. Ora, questo è variato? È incerto, per quanto forse esista un piccolo cambiamento; ma non sembra, in ogni modo, che la variazione superi il duecentesimo di quella richiesta dall'ipotesi della contrazione. Secondo la teoria delle pulsazioni, il periodo dovrebbe per altro subire una diminuzione di diciassette secondi all'anno, che l'osservazione astronomica potrebbe rivelare facilmente. Sta il fatto, che la diminuzione non supera il decimo di secondo all'anno, e però va creduto che le stelle — almeno nello stato delle *Cefeidi* — traggano alimento energetico da una sorgente diversa da quella che l'ipotesi della contrazione suggerisce.

In un problema di tanta importanza qual è questo, sarebbe sconsigliabile il limitarci ad un solo argomento; ed è invece opportuna la ricerca d'altre testimonianze, forse piú persuasive, fra le scienze affini. Sembra che le indagini fisiche e geologiche assegnino definitivamente alla *Terra* — e contando gli anni da un'êra molto piú recente di quella in cui essa nacque quale pianeta — un'età piú vetusta di quella che, secondo le stime di HELMHOLTZ e KELVIN, si attribuisce al sistema solare.

Di consueto viene giudicata rigorosa la determina-

zione dell'età delle rocce, basata sul rapporto delle quantità di uranio e di piombo scoperte nelle rocce medesime. Infatti, l'uranio si desintegra in piombo ed in elio ad una velocità nota, e siccome l'uranio e il piombo hanno proprietà chimiche diverse, possiamo escludere che i due elementi si siano deposti insieme naturalmente, mentre bisogna presumere che il piombo trovato con l'uranio derivi dalla decomposizione di questo [1]. Ora, misurando la quantità di piombo contenuto coll'uranio nella roccia, è appunto possibile determinare l'epoca alla quale è stato depositato l'uranio. Per le rocce piú antiche, s'è giunti in tal modo ad un'età all'incirca di milleduecento milioni d'anni. Da scienziati d'indiscussa autorità in questo campo, sono state proposte cifre anche piú basse, ma non tanto da riuscire a salvare l'ipotesi della contrazione.

Il *Sole*, certamente, dev'essere molto piú vecchio del nostro pianeta e delle sue rocce. Forse occorre assegnargli un'età di almeno diecimila milioni d'anni, riducibile tutt'al piú ai mille milioni. È quindi indispensabile cercare una sorgente d'energia, tanto ricca da aver potuto e poter consentire l'emissione di calore dal *Sole* e dalle altre stelle per un tempo di quest'ordine di grandezza. Il campo delle nostre indagini vien subitamente circoscritto; la fonte d'energia calorifica dev'essere cercata nel profondo interno della stella.

---

[1] È cosa accertabile pel fatto del differente peso atomico del piombo d'uranio e del piombo ordinario; quest'ultimo è un miscuglio di diverse specie d'atomi, fra loro isotopi, cioè con lo stesso numero atomico.

L'essenziale del problema non concerne tuttavia solamente la quantità di calore da irradiare, bensí il rifornimento di quello interno, onde la massa sottoposta all'azione gravitazionale è mantenuta in equilibrio. Abbiamo affermata, nella prima conferenza, l'ipotesi dell'esistenza d'una certa quantità di calore in ogni punto interno della stella, occorrente per ottenere e mantenere l'equilibrio del globo siderale. Ma se il calore interno va effluendo costantemente verso gli strati superficiali, che son piú freddi; e si irradia quindi nello spazio, costituendo la radiazione stellare; esso medesimo, od un suo equivalente, dovrà essere restituito alla stella, affinché questa si mantenga invariata, ed invece non si contragga o si evolva alla velocità indicata dall'ipotesi di KELVIN. Non è neppure pensabile che l'energia, perduta nel modo anzi detto, possa essere ripristinata con rifornimenti alla superficie dell'astro, poniamo col bombardamento mediante meteoriti. E ciò perché l'energia stessa, non potendo procedere dal meno caldo (esterno) verso il piú caldo (interno), approfitterebbe della prima occasione per abbandonare la stella sotto forma di radiazione supplementare. Insomma, potrà mantenersi il gradiente di temperatura, non già con una somministrazione di calore all'estremità finale, bensí solo con una somministrazione all'estremo iniziale: in altre parole, il calore dovrà essere generato a questo estremo, cioè nel cuore della stella.

Siccome, poi, non riusciamo a immaginare una sorgente di calore esterna, la quale versi il suo contenuto nel centro della stella, è necessario to-

gliere di mezzo definitivamente un'ipotesi secondo cui, alla fin dei conti, l'astro raccatterebbe dell'energia cammin facendo. Di conseguenza, l'energia, che consente alla stella di durare pel resto della propria vita, deve trovarsi custodita nel medesimo suo seno.

L'energia è dotata di massa, o — come molti preferiscono, e qui non occorre farne oggetto di discussione — l'energia *è* essa medesima massa. A noi interessa fissare, che un *erg* [1] di energia, in qualsiasi forma la si consideri, ha una massa di $1.1 \times 10^{-21}$ grammi. L'*erg* è l'unità che usa nelle scienze per la misura dell'energia; ma questa può anche essere misurata in grammi o tonnellate, come qualsiasi altra cosa che sia dotata di massa. Nulla perciò ci vieterebbe di comprare, ad esempio, mezzo chilogrammo di luce da una Società di distribuzione di energia elettrica, salvo che costerebbe troppo — al prezzo attuale, quasi otto miliardi di lire — e sarebbe oltremodo esuberante alle nostre necessità. Orbene, se riuscissimo a conservare tanta luce (onde eteree) in un recipiente chiuso formato da specchi che se la riflettessero indefinitamente, e se pesassimo il recipiente, troveremmo che, al peso normale di questo, occorrerebbe aggiungere i cinquecento grammi di luce contenutavi. È evidente che un dato corpo il quale pesi una tonnellata non possa contenere piú d'una tonnellata d'energia, e quindi che il

---

[1] L'*erg*, od *ergon*, è unità cosí piccola da equivalere all'energia che in un secondo potrebbe sollevare di un metro la massa di un centomillesimo di grammo (*C*).

*Sole,* avendo una massa di duemila quadrilioni di tonnellate (Pag. 23), possa contenere tutt'al piú duemila quadrilioni di tonnellate d'energia.

Una quantità d'energia pari a $1.8 \times 10^{54}$ *ergs* ha una massa di $2 \times 10^{33}$ grammi, che è la massa del *Sole*; l'astro contiene quindi altrettanta energia, di cui si alimenterà nel tempo che deve ancora vivere [1]. Non sappiamo, naturalmente, quale parte di essa sia trasformabile in calore e quale in radiazione; ma, se lo fosse per intero, basterebbe a garantire l'energia raggiante del *Sole,* con attività pari a quella attuale, per quindici bilioni d'anni. Ciò equivale ad affermare che, ove la perdita del calore emesso annualmente dal *Sole,* corrispondente ad una massa di centoventi bilioni di tonnellate, si ripetesse ogni anno in uguale misura, il nostro astro, dopo quindici bilioni di anni, non avrebbe piú massa.

---

[1] C'è forse da meravigliarsi se, dopo avere asserito che il *Sole* contiene al massimo duemila quadrilioni di tonnellate d'energia, venga ora ammesso che ne contiene giusto tanto ? È invero una mera questione di terminologia legata alla definizione scientifica che si dà all'energia. Ogni massa è la massa di qualche cosa, che qui viene chiamata " energia ", sia o non sia in una delle forme che ci sono familiari. Si vedrà nel paragrafo successivo, che non intendiamo postulare la trasformazione dell'energia in forme note; perciò la terminologia usata non è in alcun modo compromettente.

## ENERGIA SUBATOMICA

Questa riserva d'energia, tranne una quantità trascurabile, non è se non energia di formazione degli atomi e degli elettroni; cioè, energia interna degli atomi, o subatomica. Cosí, siccome la maggior parte di essa è legata alla costituzione degli elettroni e dei protoni — cariche elettriche elementari negative e positive — coi quali vien costruita la materia, come se ne libererebbe se non avvenisse la distruzione di questi corpuscoli? La riserva principale di energia d'una stella non si manifesterebbe sotto forma di radiazione, ove la materia, che costituisce la stella, a sua volta non si annichilasse. Non è impossibile che la stella viva abbastanza a lungo, senza dover depauperare sensibilmente la riserva energetica principale. Infatti, mediante un processo meno violento dell'annichilazione della materia, cioè mediante trasmutazione degli elementi, potrebbe liberarsi una piccola parte della riserva medesima, ed essa basterebbe a far splendere il *Sole* per dieci mila milioni di anni o giú di lí, periodo di tempo certo appropriato alle nostre legittime esigenze. A questo punto ci è dato scegliere: o la trasmutazione degli elementi, che giustifica una scala temporale piuttosto contratta, o l'annichilazione della materia, che ne ammette una molto piú ampia; per ora non vediamo la possibilità d'una terza ipotesi.

Ma torniamo al nostro ragionamento. Si era riconosciuto dapprima che l'energia ricavata coll'ipotesi della contrazione dell'astro è irrimediabilmente inadeguata; in secondo luogo, che l'energia deve liberarsi nell'interno della stella, e deve quindi provenire non da una sorgente esterna, bensí da una interna. Considerando l'intera energia interna, incontreremo una riserva energetica di qualche importanza, solo tenendo conto degli elettroni e dei nuclei atomici; cioè, otterremo la liberazione di una ragionevole quantità d'energia pel raggruppamento dei protoni e degli elettroni nei nuclei atomici (trasmutazione degli elementi); e d'una quantità molto maggiore, mediante l'annichilazione degli stessi corpuscoli.

La trasmutazione degli elementi — che fu il lontano e nutrito sogno degli alchimisti — trova la sua realtà nella trasformazione delle sostanze radioattive; ad esempio, l'uranio si trasforma lentamente in un miscuglio di piombo e di elio. Nessun fenomeno di radioattività, fra quelli noti, libera tuttavia una quantità d'energia sufficiente a mantenere il calore solare; una ragguardevole liberazione di energia mediante trasmutazione viene accertata soltanto all'inizio dell'evoluzione degli elementi.

Partiamo dall'idrogeno. Il suo atomo (Pag. 73) consiste semplicemente d'una carica positiva e d'una carica negativa: un protone, che forma il nucleo, ed un elettrone planetario. Fatta uguale ad uno la massa dell'intero atomo, quattro atomi di idrogeno formerebbero un atomo di elio. Orbene, se la massa dell'atomo d'elio fosse esattamente uguale a quattro,

vorrebbe dire che l'energia degli atomi di idrogeno si è trasferita per intero all'atomo di elio. Ma la massa di questo è, di fatto, pari a 3.97; per ciò, durante la formazione dell'elio dall'idrogeno, si libera una massa d'energia, pari a tre centesimi di quella dell'idrogeno. Annichilando quattro grammi di idrogeno, libereremmo quattro grammi di energia, mentre trasformandoli in elio ne libereremmo appena grammi 0.03. Quindi, è bensí possibile invocare l'uno o l'altro processo per darci ragione della produzione del calore solare; ma, come dicevamo, l'annichilazione è quantitativamente piú vantaggiosa.

La liberazione d'energia deriva dal fatto, che degli elettroni planetari appartenenti a quattro atomi di idrogeno, quando questi formano un atomo d'elio, solo due continuano ad essere elettroni planetari, e gli altri due si cementano invece coi quattro protoni, agglomerandosi solidamente per formare il nucleo atomico dell'elio. Ora, quando le cariche positive e negative giungono ad una stretta vicinanza, l'energia del campo elettrico subisce una modificazione, e vien liberata dell'energia elettrica propagantesi nello spazio sotto forma di onde eteree. Cosí appunto si disperdono i 0.03 grammi d'energia, che la stella può assorbire nella forma anzi detta, ed utilizzare in quella di calore.

Passando dall'elio agli elementi successivi non si ha quasi piú liberazione d'energia. Ad esempio, un atomo d'ossigeno può venir formato da sedici atomi d'idrogeno o da quattro atomi d'elio. Ma, per quanto a noi consta, il peso dell'atomo d'ossigeno è giusto uguale a quello di quattro atomi di elio. Di conse-

guenza, colla trasmutazione dell'idrogeno in ossigeno non si libera una quantità d'energia apprezzabilmente maggiore di quella che deriva dalla trasmutazione dell'idrogeno in elio [1]. Ciò acquista maggiore evidenza se facciamo la massa dell'atomo di idrogeno pari a 1.008: in tal caso, alla massa d'elio spetta esattamente il valore 4, ed a quella dell'atomo di ossigeno il valore 16. Di piú, com'è noto dalle indagini del dott. ASTON, eseguite collo ''spettrografo di massa'', alla massa degli atomi degli altri elementi vanno attribuiti valori esprimibili con numeri pressocché interi; la perdita di 0.008 grammi per atomo d'idrogeno si ripete con molta approssimazione, qualunque sia l'elemento formato.

L'ipotesi che l'energia d'una stella derivi dalla formazione degli elementi impiegando l'idrogeno, diremo cosí, quale materia prima, offre questo notevole vantaggio: che nulla si oppone alla possibilità d'un tal fenomeno; mentre non sapremmo testimoniare la possibilità che nella natura si manifesti l'annichilazione della materia. Qui non ci riferiamo evidentemente alla trasmutazione dell'idrogeno in elio, che si presume sia stata ottenuta nei laboratori. Queste esperienze non hanno persuaso nessuno degli studiosi di cui riconosciamo l'autorità; ma, a nostro modo di vedere, la stessa esistenza dell'elio costituisce la prova migliore della possibilità della formazione dell'elio. Se i quattro protoni

[1] ASTON, nelle sue piú recenti indagini, ha potuto accertare che l'atomo d'ossigeno è pochissimo piú leggero dei quattro atomi d'elio.

ed i due elettroni costituenti il nucleo di quest'elemento han pur dovuto unirsi in qualche luogo e in qualche tempo, perché non dovremmo ammettere che ciò abbia potuto avvenire nelle stelle? Quando appunto ebbe luogo tale unione, dovette in pari tempo essere liberata l'energia superflua, e venir cosí costituita un'abbondante provvista di calore. Invero l'interno d'una stella, dove indubbiamente è in attività una intensa sorgente calorifica, appare senz'altro ammissibile come una località adatta allo scopo. È ben certo che, per molti critici, le condizioni regnanti nelle stelle non sono spinte ai gradi estremi che potrebbero consentire la trasmutazione degli elementi: le stelle, cioè, non sarebbero per essi abbastanza calde! Ma gli si potrebbe pur chiedere dove sia da cercare un luogo piú caldo.

Il vantaggio di cui dicevamo non è per altro senza limiti. Molti dati dell'osservazione astronomica indicano infatti, che l'ipotesi, secondo cui l'energia stellare andrebbe attribuita alla trasmutazione dell'idrogeno, non è soddisfacente: se vale forse per la rapida liberazione di energia ai primi stadi della evoluzione (fase delle stelle giganti) — quando la stella è un corpo enorme e diffuso, che irradia abbondante calore —, l'energia di cui son ricche le stelle in piú tarda età sembra invece doversi attribuire ad altra sorgente, sottoposta a differenti leggi di emissione. Invero, da molteplici indagini vien suggerito che le stelle, diventando piú vecchie, debbano liberarsi di gran parte della materia da cui erano originariamente costituite; ed è chiaro che ciò non potrebbe concepirsi se non sovvenisse l'annichila-

zione della materia. Queste indagini, purtroppo, non offrono prove abbastanza coerenti, e però è immatura una conclusione definitiva. In ogni modo, l'ipotesi dell'annichilazione della materia appare, nell'insieme, la migliore, e noi la preferiremo trattando brevemente, come è nostro proposito, dell'evoluzione stellare.

Le parole ''annichilazione della materia'' suonano come qualche cosa di soprannaturale. È un fenomeno che in natura si verifica veramente? Non lo sappiamo; ma certo non riusciamo neppure ad immaginare un ostacolo che vi si opponga. Gli ultimi costituenti della materia sono minuscole cariche positive e negative, raffigurabili quali centri di tensioni eteree di opposto genere; orbene, ove si potesse farli decidere a precipitarsi l'uno sull'altro, essi si distruggerebbero a vicenda, non lasciando se non una ''perturbazione'' nell'etere, la quale, sotto forma di onda elettromagnetica, si propagherebbe lontano trasportando con sé l'energia liberata dalla distruzione della tensione. La quantità di quest'energia è enorme; annichilando una goccia d'acqua riusciremmo a poter disporre, per un anno, d'una potenza di duecento cavalli-vapore.

Il nostro occhio si volge cupidamente a questa riserva energetica, ma senza soverchie speranze di riuscire a svelare il segreto della sua liberazione. Certo, se avessimo la prova che le stelle l'hanno invece scoperto, e attingono a questa sorgente per alimentare il loro calore, sentiremmo meno lontano il giorno del felice concludersi delle nostre ricerche. Forse molti fisici considereranno lo studio dell'ener-

gia subatomica come un campo di speculazioni vane. Non cosí gli astronomi. Per l'ipotesi d'una evoluzione stellare molto piú lenta di quanto annunzia l'ipotesi della contrazione, la misura della spesa di energia subatomica è in astronomia comunissima. Altro non è, se non la misura del flusso di calore o di luce emesso dalle stelle [1].

L'insieme dei dati osservati, relativi all'attività di liberazione dell'energia subatomica, son propri, in ultima analisi, dell'astronomia pratica; e dobbiamo cercare, coi metodi comuni, di sistemare i medesimi dati, secondo un ordine coerente, per poter stabilire come l'uscita anzi detta sia legata alla temperatura, alla densità o all'età della materia che la concerne: in breve, per scoprire le leggi dell'emissione. Da questo punto in poi, la discussione sarà piú o meno ipotetica, a seconda del temperamento del ricercatore; ed è infatti verosimile che in questo, come in altri rami della scienza, si riesca a progredire coll'accorto sussidio dell'immaginazione scientifica. Certo la speculazione vana dev'essere condannata, qui come in ogni altro studio; e di essa non si sente alcuna necessità. Occorre, invece, se-

---

[1] La misura del calore che effluisce da una sorgente continua è la misura dell'uscita della sorgente medesima, tranne il caso di accumulazione d'energia fra la sorgente propriamente detta e il punto in cui viene osservato l'efflusso. Il crollo della scala delle durate di KELVIN indica che quest'accumulazione d'energia (positiva o negativa) nelle stelle e la conseguente espansione, o contrazione, sono trascurabili in rapporto all'uscita della sorgente o all'efflusso.

guire un processo di induzione, che parta dall'osservazione e tenga presenti le nostre cognizioni teoriche sulla struttura atomica e le possibilità che ne derivano.

Non potremmo concludere quest'argomento senza accennare alla radiazione penetrante, la cui esistenza nella nostra atmosfera è da lungo tempo nota e che, secondo le ricerche di KOHLHOERSTER e MILLIKAN, proverrebbe dagli spazî lontani (Pag. 11). L'alto potere penetrante di questa radiazione è un indice e della sua breve lunghezza d'onda e d'una intensa concentrazione d'energia; è, in ogni modo, maggiore di quello dei raggi *gamma*, originati da fenomeni subatomici, che si producono nelle sostanze radioattive. L'origine della radiazione medesima può essere ragionevolmente ricercata in fenomeni che si svolgono nell'interno degli atomi, quali appunto accennavamo a proposito della sorgente dell'energia stellare. Secondo le accurate misure di cui l'ha fatta oggetto MILLIKAN, le sue proprietà si accorderebbero con quelle che possiamo attribuire alla radiazione proveniente dalla trasmutazione dell'idrogeno; non sarebbe invece abbastanza penetrante per riconoscerne l'origine in un fenomeno violento, quanto è l'annichilazione protonica od elettronica.

Non sembra possa venir messa in dubbio la provenienza di questa radiazione dal cielo. Infatti, le misure della sua intensità, a differenti altezze della atmosfera, ed a differenti profondità dalla superficie di laghi di montagna, provano che si affievolisce, a seconda della quantità d'aria o d'acqua attraversata. Però la sua sorgente dev'essere extra-

terrestre, ma non solare, giacché i ''raggi cosmici'' — si chiamano anche cosí — non subiscono variazioni quando varia l'altezza dell'astro. Qualche esperienza annunzierebbe invece una variazione relativa alla differente posizione della *Via Lattea,* nel senso che sarebbe massima allorché sul punto d'osservazione culmina la massima estensione del sistema stellare [1].

La radiazione non può nemmeno provenire dall'interno delle stelle, ché il suo potere penetrante sarebbe maggiore, dovendo varcare le impenetrabili pareti che intercettano la materia piú calda e piú densa dell'Universo; tutt'al piú, potrebbe venire solo dall'inviluppo stellare superficiale, di bassa temperatura e di debole densità; ma è molto piú probabile che la sua sorgente principale sia nelle nebulose diffuse o, magari, nella materia ond'è costituita la nube generale dello spazio [2].

Cosí, prima di considerare l'origine subatomica di questi raggi se non come una mera ipotesi, appare la necessità di nuovi accertamenti. Qui vien ricordata solo perché può essere utile al progresso scientifico. Sarebbe invero molto interessante giungere per tal via ad una conoscenza piú immediata del fe-

---

[1] Questo fatto non è confermato dalle indagini piú recenti.

[2] Le stelle considerate nel loro insieme coprono un'area celeste molto inferiore al disco apparente del *Sole*; e quindi non può attribuirsi ad esse l'origine della radiazione se non ammettendo che i loro strati superficiali generino la radiazione medesima in quantità molto maggiore di quanto non avvenga pel *Sole*.

nomeno in cui supponiamo la sorgente dell'energia stellare: certo i messaggi recati dai raggi cosmici, che appaiono legati a questi fenomeni, meritano la piú seria attenzione.

Le nostre idee sull'energia stellare sono suscettibili di modificazione su un punto fondamentale. È stato fin qui ammesso, di regola, che l'altissima temperatura esistente nell'interno d'una stella fosse condizione essenziale per la liberazione dell'energia subatomica, e che dovesse tuttavia assegnarsi una importante funzione ad una densità sufficientemente elevata. In teoria sembrerebbe infatti quasi incredibile, che la formazione di elementi superiori, o l'annichilazione protonica ed elettronica, avessero luogo con relativa abbondanza nelle regioni dove gli incontri fra corpuscoli e fra vibrazioni sono rari, e dove fan difetto tanto un'elevata temperatura quanto un'intensa radiazione, le quali scuoterebbero gli atomi dalla loro apatia. Ma quanto piú ci poniamo di fronte alle difficoltà create dalle diverse teorie sulla liberazione dell'energia subatomica, tanto meno ci sentiamo autorizzati a ripudiare, e creder false, le varie testimonianze.

La presenza del sodio e del calcio nella nube cosmica, e dell'elio e del nebulio nelle nebulose diffuse, e di grandi quantità di titanio e di zirconio nelle atmosfere delle stelle piú giovani attestano che l'evoluzione degli elementi è già progredita durante lo stadio diffuso prestellare; a meno che, invero, il nostro Universo non sia stato formato dai frantumi d'una creazione precedente. In questo caso, sarebbe possibile e legittimo rintracciare nello spazio libero

sintomi di attività subatomica. Ma il fisico, innanzi a questo problema, potrebbe a ragione scuotere la testa. Come avviene che quattro protoni e due elettroni si uniscano per formare un nucleo d'elio, in un mezzo rarefattissimo, dove il libero percorso dura quarantotto ore? Se il modo di prodursi di questo fenomeno, allo stato delle nostre attuali conoscenze, è inconcepibile sotto qualsiasi condizione di densità e di temperatura, non ci resta che il conforto di poterlo postulare nelle nebulose, se tanto vale essere impiccati per una pecora rubata, quanto finire sulla forca pel furto di un agnello.

## L'EVOLUZIONE DELLE STELLE

Vent'anni fa sembrava che l'evoluzione stellare avvenisse semplicemente. Si credeva che le stelle, molto calde all'origine, si raffreddassero a grado a grado fino a morire, e quindi che la temperatura potesse servire a rivelare lo stadio d'evoluzione. Il corso di questa poteva essere seguíto abbastanza bene, osservando all'ingrosso i differenti colori: stella al calor bianco, stella al calor giallo, stella al calore rosso; mentre per una piú precisa determinazione della temperatura sovveniva l'analisi spettroscopica della luce emessa dagli astri. Le stelle rosse si collocavano cosí alla fine della serie evolutiva, e avrebbero dovuto essere le piú vecchie, alla vigilia di spegnersi. Sir Norman Lockyer, anticipando le piú moderne concezioni, si fece a combattere strenua-

mente lo schema anzi detto; la maggior parte degli astronomi, invece, lo seguí fino al 1913.

Dieci anni fa, essendosi notevolmente arricchite le nostre cognizioni sulla densità delle stelle, questa sembrò adatta a fornire un criterio, piú diretto di quello suggerito dalla temperatura, per riconoscere lo sviluppo evolutivo degli astri. Ammesso, infatti, che una stella derivi dalla condensazione di materia nebulosa, si arguisce che essa sia molto diffusa all'età giovanile, vada in seguito contraendosi, e cresca via via di densità.

Poiché l'ordine segnato dalla densità non è il medesimo di quello suggerito dalle temperature superficiali degli astri, lo schema evolutivo deve assumere una sistemazione affatto diversa. Invero, secondo la prima concezione, tutte le stelle rosse e fredde sono da giudicarsi vecchie e morenti; ma essendo molte di esse, quale *Betelgeuse,* estremamente diffuse, occorre considerarle fra le stelle piú giovani. Ciò si accorda colle nuove concezioni; e ben naturalmente se, in altre parole, equivale a dire che, trovandosi al bel principio di condensazione della materia nebulosa, una stella si affaccia alla vita dal livello piú basso delle temperature. Non tutte le stelle rosse sono tuttavia diffuse; anzi parecchie sono simili, per l'elevata densità, a *Krueger 60,* e ragionevolmente gli conserveremo il compito di rappresentarci l'ultimo stadio d'evoluzione. Il primo e l'ultimo periodo della vita d'una stella, la quale sale fino ad una temperatura massima e quindi ne discende, hanno entrambi questa caratteristica: vi regnano temperature basse.

La ''teoria delle stelle giganti e nane'', proposta da HERTZSPRUNG e da RUSSEL riesce ad ordinare tali conclusioni in modo eccellente. Essa riconosce l'esistenza d'una serie di stelle ''giganti'', o stelle alquanto diffuse a temperatura crescente, e d'una serie di ''nane'', o stelle dense a temperatura decrescente, affermando altresí un punto di raccordo delle due serie alle temperature piú elevate. In questo modo una data stella, nel corso della sua vita, ascende per la serie delle giganti fino a raggiungere la sua temperatura massima e poi discende per la serie delle nane. La luminosità rimane press'a poco costante nello stadio di stella gigante, dove il crescere graduale della temperatura viene equilibrato dalla contrazione della superficie; mentre allo stadio di stella nana la temperatura decresce e parimente si contrae la superficie, coll'effetto del rapido declinare dello splendore, man mano che la stella discende verso il suo destino finale. Tutto ciò sembra si armonizzi coi risultati dell'osservazione, e per questo la teoria riesce a guidare le indagini piú recenti dell'astrofisica, e concorre a mettere in chiaro molti fatti importanti. Basti l'esempio seguente. Una stella gigante ed un'altra nana possono avere la medesima temperatura superficiale e produrre per ciò spettri molto simili; nondimeno, ad un esame piú attento, vi si rivelano indubbie differenze, alla stregua delle quali è possibile ora accertare facilmente se trattisi di una stella gigante diffusa o d'una nana densa.

La teoria trae la sua piú suggestiva caratteristica dal fatto che consente una semplice interpretazione dell'aumento e della diminuzione di temperatura.

Erasi supposto, invero, che il passaggio dalla serie gigante a quella nana avvenisse a quel valore della densità (all'incirca un quarto della densità dell'acqua) per cui la materia assumeva proprietà notevolmente diverse da quella d'un gas perfetto. LANE aveva pur dimostrato, cinquant'anni prima, che una sfera di gas perfetto doveva diventare piú calda al progredire della sua contrazione, seguendo per la misura del calore nell'interno d'una stella il metodo indicato a pagg. 6-7. Il crescere della temperatura delle stelle allo stadio gigante era quindi previsto: esso dipende essenzialmente dalla facile comprimibilità del gas, e quando questa viene perduta alle forti densità, è da aspettarsi di trovare temperature decrescenti; la stella si raffredda, cioè, come potrebbero un liquido od un solido. Cosí appunto, al tempo cui ci riferiamo, credevano di poter spiegare lo stadio delle stelle nane.

Fin qui abbiamo cercato di richiamare le idee di venti e dieci anni fa: non va tuttavia creduto che, allo stato attuale della scienza, possano essere interamente condivise da noi. Abbiamo voluto tenerci di proposito sulle generali senza indicare, parlando della temperatura d'una stella, se si trattava della temperatura interna o di quella superficiale, giacché intorno a questo punto correvano idee alquanto incerte. Né abbiamo fatto cenno delle ''nane bianche'' le quali vanno considerate, oggidí, fra le stelle piú dense e, forse, fra le piú vecchie. In specie, contrasta coi risultati delle nostre piú recenti indagini l'ipotesi che la materia cessi dal comportarsi come un gas perfetto pervenendo ad un quarto della densità del-

l'acqua. Non possiamo piú continuare ad ammettere tale ipotesi; e l'aver trovato (Pag. 42) che la materia delle stelle nane dense è ancora allo stato d'un gas perfetto segna un colpo fatale per questa parte della teoria delle stelle nane e giganti.

Sarebbe difficile affermare qual è la teoria dell'evoluzione stellare oggi accettata: materia tuttavia in fermento, bisogna attendere ne sorga qualcosa che soddisfi, e dobbiamo prepararci ad un riesame totale della questione ancora in gran parte misteriosa. In modo provvisorio ammetteremo che la teoria precedente colga il vero almeno stabilendo il corso evolutivo stellare nella successione dalle stelle meno dense alle piú dense. Anche questa è una mera ipotesi, che la teoria precedente doveva porre per ragioni allora buone, ma oggi non piú invocabili; e noi la ripetiamo, pur non avendo la certezza della sua legittimità. Finché nella contrazione veniva riconosciuta la sorgente del calore stellare, la contrazione medesima e il crescere della densità erano fattori essenziali nell'intero corso della vita della stella; ma accettando l'ipotesi dell'energia subatomica, la contrazione non può piú avere la parte principale che le veniva attribuita.

Ora ci soffermeremo intorno alle stelle nane [1], per le quali appunto è occorso il rivolgimento delle opinioni. Esse formano una serie ben definita, che si svolge dalle temperature superficiali elevate a quelle

[1] Fra le quali non sono comprese le stelle di eccezione, dette "nane bianche".

basse, dalle luminosità intense a quelle deboli, mentre la densità va gradatamente crescendo dall'uno all'altro estremo della serie. Chiameremo questa serie, che comprende la maggior parte delle stelle, ''serie principale''. Per fissare le idee considereremo tre stelle soltanto: *Algol* all'estremo superiore, il *Sole* quasi al centro, *Krueger 60* all'estremo inferiore; e riassumiamo quanto è noto su di esse in questo specchietto:

| Stella | Massa (Sole = 1) | Densità media (acqua = 1) | Temperatura centrale (milioni di gradi) | Temperatura superficiale (in gradi) | Colore | Splendore (Sole = 1) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Algol* ..... | 4.3 | 0.15 | 40 | 12.000 | bianco | 150 |
| *Sole* ..... | 1 | 1.4 | 40 | 6.000 | giallo | 1 |
| *Krueger 60* | 0.27 | 9.1 | 35 | 3.000 | rosso | 0.01 |

Secondo il concetto medesimo di evoluzione, le tre stelle rappresenterebbero gli stadi pei quali passa una stella [1] nel corso della sua vita; e l'andamento

[1] Non possiamo ammettere, senz'altro, che le stelle, una volta raggiunta la serie principale, passino tutte esattamente pei medesimi stadi. Ad esempio, *Algol*, allorché si sia ridotta alla massa del *Sole*, può manifestare lievi differenze di densità e di temperatura rispetto a quelle solari; ma i dati dell'osservazione sono ben chiari nell'affermare l'esiguità di questi divarî individuali. La serie principale co-

crescente della densità, quale appare nella terza colonna e si accorda col criterio da noi seguíto, indica che gli stessi stadi si susseguono nell'ordine: da *Algol* al *Sole* alla stella *Krueger 60.*

Taluni errori contenuti nelle vecchie concezioni vanno attribuiti alla confusione che si faceva fra la temperatura interna e quella superficiale. Considerata all'esterno, invero, una stella va raffreddandosi dai dodicimila gradi ai tremila. La temperatura centrale, invece, non varia sensibilmente — né la lieve diminuzione, che sembra palesare la *Krueger 60,* deve far credere il contrario — ed è ben caratteristico che per le stelle della serie in questione si mantenga intorno ai quaranta milioni di gradi: cifra approssimata quanto consentono i nostri calcoli. Il nostro intuito fisico suggerisce di non andar troppo oltre nelle congetture, ma indubbiamente è difficile resistere alla tentazione di supporre che a questa temperatura si associ una qualche straordinaria proprietà.

Il punto vitale della questione è costituito dalla diminuzione della massa indicata nella seconda colonna ed esprimibile dicendo che: se una stella isolata discende per un tratto qual-

---

stituisce una successione o " sequenza ", rappresentabile press'a poco da una linea continua, di una certa lunghezza, come anche di una qualche larghezza. Finora, tuttavia, questa larghezza — cioè lo scarto di singole stelle dalla linea centrale della sequenza — sembra attribuibile agli errori dei dati raccolti dalle osservazioni, e non ne è stato per anche determinato il valore effettivo.

siasi della serie principale, deve di necessità perdere una parte di massa; o in modo piú generale, giacché la luminosità dipende principalmente dalla massa, va detto che non può darsi un'evoluzione notevole dalle stelle brillanti a quelle deboli, senza che le stelle medesime subiscano una considerevole perdita della loro massa.

L'ipotesi dell'annichilazione della materia è stata seriamente esaminata proprio a causa di questo principio; e dalla sua sorte vengon fatti dipendere gli sviluppi successivi della teoria dell'evoluzione stellare. Accettando questa ipotesi, si riesce senz'altro ad interpretare le dichiarate variazioni: dopo essere passata per lo stadio gigante, una stella deve raggiungere lo stadio di *Algol* e poi, data la graduale annichilazione della materia, discendere per la serie principale, fino a quando — ridottasi alla massa d'un sedicesimo del valore primitivo — diviene una debole stella rossa, simile alla *Krueger 60*. Se l'annichilazione della materia invece non ha luogo, lo sviluppo della stella, che ha raggiunto lo stadio delle nane, sembra fermarsi, ed essa deve rimanere situata al posto della serie che corrisponde ad un valore costante della propria massa.

Cerchiamo di capire bene qual è il punto controverso. Le stelle subiscono coll'irradiazione una perdita di massa: il fenomeno non può venir negato, ed il *Sole* perde, infatti, 120 bilioni di tonnellate all'anno, non importa se per l'effetto di annichilazione della sua sostanza o per altra fonte interna. Orbene, quanto durerà ancora una siffatta perdita?

O non v'è annichilazione di materia, e tutta la massa disponibile per le anzidette cause interne verrà irradiata in un tempo relativamente breve: il *Sole* si spegnerà, ponendo termine nell'istesso tempo alla perdita di massa, e concludendo la propria evoluzione. Od invece l'annichilazione esiste, e la vita dell'astro e la perdita di massa devono continuare molto piú a lungo; il *Sole* avrà ancora schiusa innanzi a sé la possibilità di giungere lontano sulla via dell'evoluzione; e, quando si sia liberato dei tre quarti dell'attuale massa, diventerà una stella debole, simile alla *Krueger 60*.

Cosí, la scelta che noi facciamo, tra le possibili teorie concernenti l'energia subatomica, investe un sol punto dell'evoluzione stellare; ma è, come dicevamo, un punto vitale. Non far cadere la scelta sull'annichilazione della materia vale quanto abbreviare la vita d'una stella, a tal punto da non lasciarle il tempo che le occorre per evolversi completamente.

Comprendiamo certo tutti come sia censurabile sopraelevare soverchiamente le costruzioni fondate su un fenomeno ipotetico, del quale non s'abbia ancora la prova diretta che le leggi naturali ne consentano l'esistenza. Per altro, dovremmo assuefarci all'uniforme e pigro sonno delle stelle, ed alla loro rinuncia a evolversi o a variare per tutto il tempo della loro vita? Bisogna pure che qualcosa risvegli codeste abitatrici celesti, dando loro quella attività, di progresso o di decadenza, nella quale abbiamo sí a lungo creduto. Però ci afferriamo disperatamente all'estrema possibilità apparente, sic-

ché il sistema pietrificato si animi e le ultime particelle cedano, l'una dopo l'altra, la propria energia, e si spengano morendo. Nel sacrifizio di queste, tuttavia, è la forza vitale onde le stelle possono avanzare verso la sublime avventura:

«Nella rovina d'atomi o sistemi, — ora labili sfere si frantumano, ed ora un nuovo mondo si discioglie.» [1]

## RADIAZIONE DI MASSA

La costanza delle condizioni fisiche della δ *Cephei* aveva costituito la prima prova della necessità di invocare per l'evoluzione stellare una scala temporale molto estesa. A rendere la prova piú sicura, si aggiungeva poi l'accertamento dell'enorme durata dei periodi geologici terrestri. Di conseguenza, non restava che fissare un limite massimo alla velocità del corso evolutivo, ed un minimo all'età delle stelle; ma porre questo limite significava abbandonare l'ipotesi della contrazione, per riferirci, invece, all'energia interna degli atomi stellari.

Procederemo ora ad un altro attacco, basandoci sulla convinzione che: la velocità dell'evoluzione sia determinata dalla velocità alla quale una stella va perdendo la

---

[1] *Atoms or systems into ruin hurl'd, — And now a bubble burst, and now a world.*

propria massa. Però qui si considera soltanto l'evoluzione delle stelle deboli, distinguendole da quelle molto luminose, e non tenendo conto degli sviluppi relativi allo stadio delle giganti, al quale i nostri ragionamenti non si applicano direttamente. La rinunzia a credere in un'evoluzione fra le stelle luminose e quelle deboli equivarrebbe ad ammettere che la differenza di splendore di due stelle sia una differenza originaria. Orbene, questo può anche essere vero; ma non sarebbe lecito abbandonare senza colpo ferire il campo dell'evoluzione delle stelle.

Con questo nuovo metodo d'attacco, riusciamo a determinare precisamente il tempo che ci vuole perché l'evoluzione si compia, senza pure accontentarci d'un limite inferiore. Conosciuta la velocità a cui le stelle vanno ad ogni stadio perdendo massa per irradiazione, è invero possibile calcolare il tempo occorrente per la perdita di una data quantità di massa e, quindi, pel passaggio ad uno stadio cui corrisponde una massa inferiore. L'evoluzione da *Algol* al *Sole* richiede 5 bilioni di anni, l'evoluzione dal *Sole* alla *Krueger 60* ne richiede 500 bilioni, ed è interessante rilevare che le stelle nello stadio compreso fra il *Sole* e la *Krueger 60* sono molto piú numerose di quelle fra *Algol* ed il *Sole*; fatto che, in certo qual modo, conferma la validità dei nostri calcoli concernenti la durata dei due stadi. Il numero, già elevato, delle stelle deboli non cresce tuttavia tanto rapidamente quanto richiede la durata che suggerisce il calcolo, forse perché l'Universo non ha ancora tale

età da avergli fatto accogliere un'adeguata rappresentanza di stelle veramente vecchie.

Poiché una stella di massa piú grande di quella di *Algol* dissipa la sua massa molto rapidamente, l'età del *Sole* non acquista certo un aumento sensibile se supponiamo nell'astro una massa originaria maggiore di quella di *Algol*. Cosí l'età attuale del *Sole* risulta al massimo di 5.2 bilioni d'anni, qualunque ipotesi facciamo sull'entità della massa iniziale.

Ma possiamo domandarci: una stella riuscirà ad accelerare il corso della propria evoluzione liberandosi della sua sostanza in modo diverso dall'irradiazione? Non potrebbe darsi che gli atomi evadessero dalla superficie dell'astro? Se questo avvenisse, la perdita di massa e la conseguente evoluzione ne verrebbero accelerate, e forse il tempo richiesto per la medesima evoluzione potrebbe essere condotto all'ordine di grandezza di quello suggerito dall'opposta teoria della trasmutazione degli elementi. È ben certo, tuttavia, che la massa, evasa sotto forma di atomi materiali, è trascurabile al confronto di quella che abbandona l'astro impercettibilmente, sotto forma di radiazioni. C'è da domandarsi se i 120 bilioni di tonnellate di materia perduta ogni anno dal *Sole* rappresentino dal punto di vista astronomico una quantità grande o piccola. Certo, sotto alcuni aspetti è grande, pari a piú di centomila volte la massa della cromosfera di calcio; e, per una piú evidente comprensione delle cifre, diremo che, corrispondentemente, il *Sole* dovrebbe rinnovare la sua cromosfera ogni cinque minuti. A tanto equivale la

massa perduta per irraggiamento; ma, osservando il *Sole*, nessuno è riuscito ad accertare un'espulsione di materia di questa entità. In altre parole, per ridurre alla metà la durata d'evoluzione sopra indicato, occorrerebbe che da un centimetro quadrato della superficie solare sfuggisse al secondo un milione di milioni di atomi. Crediamo cosí di poter concludere che, comunque raccorciando la durata, non perciò riusciamo a postulare una piú rapida diminuzione della massa e che, praticamente, la perdita di massa è dovuta per intero all'irradiazione.

Avevamo detto nella prima conferenza (Pag. 23) che la natura, costruendo tutte le stelle di massa molto simile, si permette di allontanarsi dal modello con scarti i quali qualche volta conducono all'errore di uno zero. Crediamo ora d'essere stati ingiusti verso la natura, e di dover quindi ammettere che essa lavori con cura maggiore di quella che avevamo supposto. Invero avremmo dovuto esaminare le monete nuove di zecca, non prenderle cosí alla rinfusa, e comprendervene molte che, avendo già circolato per alcune centinaia di bilioni di anni, s'erano assottigliate a causa del lungo uso. Considerando le stelle di nuova formazione, cioè le stelle diffuse, troviamo che la massa del novanta per cento è compresa fra due volte e mezzo e cinque volte e mezzo quella del *Sole*, sicché le stelle si tengono in origine molto simili al modello, come avviene degli esseri umani. In questo divario di massa, la pressione di radiazione cresce dal 17 al 35 per cento della pressione totale, e reputiamo di poter riconoscere uno stadio cruciale in rapporto alla crescente importanza che

tende ad assumere la pressione della radiazione (vedi pag. 25). Secondo noi, le masse stellari posseggono inizialmente un'uniformità quasi perfetta (senza pure escludere l'esistenza di un piccolo numero di stelle situate eccezionalmente di là dai limiti anzi detti); e le masse piú piccole derivano da queste, evolvendosi nel corso del tempo per effetto dell'irradiazione della massa.

Nel tempo che corre, il *Sole* è certo sistemato a suo bell'agio nell'attuale stato: la quantità di energia irradiata trova appunto compenso nell'energia subatomica che si libera nell'interno dell'astro. Il quale finirà tuttavia per rimettersi in marcia; marcia od evoluzione, che procedono in modo continuo, ma che, per semplicità d'esposizione, ammetteremo avvengano discontinuamente. Due sono i motivi di possibile variazione che riusciamo ad immaginare. Il primo, che la provvista di energia subatomica diminuisca per esaurimento e non possa piú compensare quella spesa nell'irradiazione; l'altro, che il *Sole* diventi a poco a poco una stella di massa piú piccola. Le teorie piú arretrate invocano di regola il primo motivo, e può essere tuttavia mantenuto per lo stadio gigante; occorre invece, ed evidentemente, invocare la perdita di massa [1] come la ragione che fa discendere la serie principale. La di-

[1] L'esaurimento dell'energia, se non fosse accompagnato da una variazione della massa, farebbe contrarre la stella ed aumentare la sua densità; dovrebbe esistere, quindi, una combinazione fra densità e massa, che non si è tuttavia riconosciuta nelle stelle osservate finora.

stinzione fra stelle giganti e stelle nane, che sostituisce quella vecchia fra gas perfetto e gas imperfetto, sembra vada ricercata in questo: che la produzione d'energia subatomica — abbondante ma soggetta ad un rapido esaurimento nello stadio delle giganti — non abbia piú luogo, e ceda invece il posto ad una piú stabile riserva d'energia, nello stadio delle nane.

Quando il *Sole* sia diventato una stella di massa piú piccola, gli occorrerà il ripristino delle sue condizioni interne. Supponiamo che esso cerchi anzi tutto di conservare l'attuale densità. Come spiegavamo nella pagina 6, può calcolarsi la temperatura interna e troviamo che la riduzione di massa, ove la densità non muti, comporta un abbassamento di temperatura. Questa chiuderà un poco il rubinetto, regolante l'efflusso di energia atomica interna, giacché la liberazione di tale energia è senza dubbio tanto piú rapida quanto piú la temperatura è elevata. L'efflusso ridotto non sarà quindi piú sufficiente a compensare l'energia irradiata. Di conseguenza, la stella si contrarrà esattamente quanto faceva supporre la vecchia ipotesi della contrazione; e ciò vale quanto ammettere tutto aperto il rubinetto della energia subatomica. La variazione avviene, insomma, per effetto della perdita di massa, e ne deriva, prima d'ogni altra cosa, un aumento di densità in cui va riconosciuta un'altra caratteristica dell'andamento discendente della serie principale.

Progredendo sulla via delle conseguenze, troviamo che, quando cresce la densità, anche la temperatura

sale; e però il rubinetto dell'energia subatomica si apre. Non appena l'efflusso di questa giunge a compensare la perdita di energia per irradiazione, la contrazione si arresta, e la stella rimane in equilibrio con una massa piú piccola e una densità maggiore.

Ecco, dunque, che occorre invocare le leggi di liberazione dell'energia subatomica, ove si voglia spiegare quantitativamente perché mai, nell'andamento della serie principale, una data densità corrisponda ad una massa data. La contrazione deve durare quanto occorre per portare le condizioni interne ad uno stato tale che la liberazione dell'energia subatomica assuma esattamente il valore richiesto pel compenso dell'energia irradiata.

Tutto ciò forse non è molto semplice; ma volevamo soltanto dimostrare che l'assestamento d'una stella, successivo alle variazioni di massa, avviene automaticamente. L'astro, quando abbia subíto una di queste variazioni, deve provvedere di nuovo a costituirsi quelle condizioni interne che sono necessarie al suo equilibrio. Finché si tratta di condizioni meccaniche (quali sono quelle di sostenere gli strati superiori) può scegliere un qualsiasi stato d'una serie di stati di differenti densità, purché il valore della sua temperatura interna si adegui alla densità scelta. Ma un equilibrio del genere è soltanto temporaneo, e la stella non potrà assestarsi ad un livello inferiore, se non quando il rubinetto dell'energia subatomica sia aperto giusto quanto è necessario per compensare la quantità dell'energia perduta per irradiazione; il cui valore, come ab-

biamo già visto, vien fissato in pratica dalla massa. La stella appunto si serve del rubinetto fino a raggiungere quest'equilibrio.

Il prof. RUSSELL è giunto ad un'importante conclusione in proposito. Quando la stella vien cosí regolando il rubinetto, non lo fa intelligentemente; ad un tentativo deve seguirne automaticamente un altro, e — fatto importantissimo — questo, automaticamente, non già allontana, ma avvicina al valore cercato. La condizione per giungere vicino a questo valore è che la liberazione di energia subatomica cresca colla temperatura o la densità [1].

Se essa diminuisce, oppure si mantiene inalterata, le prove di assestamento saranno sempre piú lontane dalla sistemazione richiesta, sicché, pur essendo possibile un equilibrio stabile, la stella non potrà mai trovarlo. È quindi essenziale ammettere, come legge della liberazione dell'energia subatomica, che il processo di assestamento cresca colla temperatura o colla densità o con entrambe; altrimenti, l'energia subatomica non risponderebbe alla funzione per cui è stata introdotta: quella di mantenere la stella in equilibrio per un tempo lunghissimo.

Lo strano si è, che la condizione di equilibrio vien raggiunta quando la temperatura centrale è prossima ai 40 milioni di gradi: sempre la stessa, che la stella si trovi all'estremo superiore o a quello inferiore o alla metà della serie principale. Le stelle

---

[1] Quest'aumento veniva già ammesso nella nostra descrizione particolareggiata del riassetto automatico della stella; e si vedrà come una simile ipotesi fosse essenziale.

situate all'estremo superiore liberano per ogni grammo di materia 700 *ergs* di energia al secondo, mentre il *Sole* non ne libera che 2 e la *Krueger 60* soltanto 0.08 *ergs*. Sembra straordinario che delle stelle, richiedenti tali diverse quantità d'energia debbano raggiungere, per procurarsele, la medesima temperatura; come se le stelle a temperature inferiori di questa temperatura-tipo, o critica, non trovassero disponibili neppure 0.08 *ergs* al secondo, ed invece ne trovassero una quantità praticamente illimitata non appena raggiunta la detta temperatura. È difficile pensare ad una specie di punto d'ebollizione (indipendente dalla pressione) al quale la materia dovrebbe bollire, trasformandosi in energia; tutto il fenomeno ci lascia invero molto perplessi.

Dobbiamo aggiungere che le stelle giganti hanno temperature considerevolmente inferiori ai 40 milioni di gradi. Parrebbe che esse ricorrano a speciali riserve di energia subatomica, liberabili a temperature piú basse, e che, una volta esaurite queste riserve, le stelle passino nella serie principale, per attingere alla riserva generale. Ma questa non dovrebbe durare indefinitamente e però la stella, o quanto ne rimane, abbandonerebbe la serie principale per passare allo stadio delle nane bianche.

Considereremo ora una questione, che certo avrebbe potuto essere suggerita anche prima; e cioè perché la δ *Cephei* sia una stella pulsante. Potrebbe ammettersi che l'oscillazione sia stata provocata all'inizio da qualche accidente. Per quanto ci è consentito prevedere col calcolo, un'oscillazione dure-

rebbe dal momento della sua origine, fino a smorzarsi completamente, qualcosa come diecimila anni. Ma diecimila anni costituiscono un periodo pressocché trascurabile nella vita d'una stella e, dato il gran numero delle *Cefeidi*, questa spiegazione sarebbe inadeguata, anche se potessimo immaginare quale sia l'accidente supposto. È però molto piú probabile che la pulsazione si produca spontaneamente. Dalla stella vengono infatti liberate enormi provviste di energia calorifica, molto maggiori di quelle occorrenti per provocare e mantenere la pulsazione; e due almeno sono i modi in cui questo calore può determinare un fenomeno di pulsazione.

Vediamo il primo, supponendo per ora una pulsazione molto piccola. Quando la stella è compressa, la sua temperatura e la sua densità sono piú elevate delle normali, e il rubinetto dell'energia subatomica è tutto aperto. La stella acquista calore, e la forza d'espansione, determinata dall'eccesso di energia calorifica, favorisce il contraccolpo della compressione; quando l'espansione arriva ad un massimo, il rubinetto si chiude un poco, e quindi la perdita di calore che ne proviene fa diminuire la resistenza opposta alla susseguente compressione. Le successive espansioni e compressioni diventano perciò sempre piú intense, e da una perturbazione iniziale molto piccola si può giungere ad un'ampia pulsazione. Cosí, la stella manovra il rubinetto dell'energia subatomica all'istesso modo d'una macchina che fa funzionare la valvola di immissione del calore nel suo cilindro: le pulsazioni d'una stella hanno la stessa origine delle vibrazioni d'una macchina.

La sola obiezione che possiamo opporre a questa spiegazione è data dal fatto che essa è troppo esauriente. Essa dichiara perché ci si possa attendere che una stella pulsi; ma il difficile sta in ciò, che le stelle pulsanti vanno considerate piuttosto come eccezioni rare. Adesso è tanto facile darci ragione delle *Cefeidi,* che abbiamo appena da fare un passo indietro per affrontare il problema, piú difficile, del perché siano invariabili le stelle ordinarie. La pulsazione si ha solo se la macchina pulsante è abbastanza potente per vincere le forze le quali tendono a spegnere e ad eliminare le pulsazioni. Non possiamo tuttavia ammetterla o negarla in una stella qualsiasi alla stregua delle teorie ammesse; e però dobbiamo cercare di formulare le leggi di liberazione dell'energia subatomica, sí da renderle conformi a ciò, che la piú parte delle stelle rimangono invariabili, ma che si dànno condizioni di massa e di densità per le quali le forze pulsanti acquistano il sopravvento.

La pulsazione delle *Cefeidi* è una specie di malattia che colpisce le stelle giovani e, quando queste l'hanno superata, irradiano con continuità. Ma vi potrebbe essere un altro attacco di malattia, anche dopo la giovinezza, quando la stella va soggetta a quelle catastrofiche esplosioni che provocano la comparsa delle stelle ''nuove'' o *novae.* Ben poco sappiamo tuttavia in rapporto alle cause di queste esplosioni; se siano, cioè, spontanee o provocate da agenti esterni.

Finché ci teniamo sulle generali, la teoria della energia subatomica, e specialmente la teoria dell'an-

nichilazione della materia, lascia adito ad ogni rosea speranza: la perplessità e i dubbi cominciano allorché ci facciamo a considerare i particolari tecnici. Cosí si manifestano difficoltà per la presenza simultanea, nonostante il diverso sviluppo evolutivo, di stelle giganti e di stelle nane in ammassi stellari della medesima età. Vi sono difficoltà, se si postulano leggi di liberazione dell'energia subatomica tali da salvaguardare la stabilità delle stelle senza condurle tutte a pulsare; difficoltà ancora perché, di regola, quanto piú basse sono la temperatura e la densità nello stadio delle giganti, tanto piú rapida diviene la liberazione d'energia: ciò che nel complesso si spiega coll'esaurimento di piú ricche sorgenti d'energia, senza tuttavia riuscire ad armonizzare i fatti mediante questa ipotesi. Gravi difficoltà sorgono, infine, allorché si vogliono conciliare le leggi di liberazione dell'energia, quali vengono dedotte dalle osservazioni astronomiche, con le raffigurazioni teoriche che possiamo dare al fenomeno di annichilazione della materia, mercé l'azione fra atomi, elettroni e radiazioni.

L'argomento è importantissimo, ma qui non lo possiamo svolgere quanto occorrerebbe. Quando la guida della teoria è chiara, ci volgiamo soprattutto alle linee maestre; quando la teoria è rudimentale, i particolari tecnici ci sembrano invece piú interessanti e li analizziamo con ansia, giacché appaiono favorire ora un'ipotesi ora un'altra. Noi ci siamo occupati soprattutto di due punti salienti: il problema della sorgente di energia delle stelle e la variazione di massa, che deve aver luogo se vi è una evoluzione

qualsiasi dalle stelle luminose a quelle deboli; ed abbiamo mostrato come questi punti appaiano incontrarsi in virtú dell'ipotesi dell'annichilazione della materia. Non crediamo che quest'ipotesi sia conclusiva e certa, ed esitiamo persino ad affermarne la probabilità, poiché ci sembra che molti particolari la neghino, mentre nutriamo la convinzione che qualche punto sostanziale debba ancora essere appurato: l'abbiamo descritta semplicemente come una via, che cerchiamo di seguire senza pur sapere se sia falsa o giusta.

Dovremmo ora concludere con un'elevata perorazione. Ma forse meglio si conviene alle vere condizioni del progresso scientifico che la conclusione si perda nella fugace visione dell'oscurità da cui sono segnati i confini del nostro attuale sapere. Né ci scusiamo della debolezza della conclusione, perché, appunto, non è una conclusione. Saremo contenti se invece potrà costituire l'inizio di nuove ricerche.

## IV

# MATERIA COSMICA NELLO SPAZIO

Uno spauracchio che scompare – Le righe fisse del sodio e del calcio, prova dell'esistenza d'una nube cosmica – Un atomo ogni sedici centimetri cubi – Ionizzazione, " quanti " e temperatura – L'atomo di calcio nella nube cosmica – Materia cosmica sulle stelle.

Ora vogliamo dire di una nube di gas molto rarefatto, sparsa fra le stelle dell'Universo; e ricorderemo anzi tutto la vastità dello spazio e l'enorme isolamento delle stelle che, nonostante le gigantesche dimensioni, non sono se non piccole oasi di materia, perdute in un deserto di vuoto. I raggi di luce, cioè i piú rapidi viaggiatori di questo deserto, impiegano quattro anni per andare da un'oasi alla piú vicina, poniamo dal *Sole* alla stella piú prossima; impiegano soltanto otto ore[1] per attraversare il sistema solare dall'uno all'altro estremo; e continuando a viaggiare pel deserto di vuoto, gli occorrono altri sei anni per toccare la prossima oasi, che parimente può essere percorsa in poche ore. Ma perché i raggi

---

[1] L'Autore si riferisce al sistema solare quale veniva considerato prima della scoperta del pianeta *Plutone* (*C*).

abbiano la fortuna di questi incontri, devono cercarli andando a zig-zag; altrimenti, procedendo su una via diritta, difficilmente riuscirebbero ad approdare sulle lontane oasi: se le vedrebbero sfuggire in lontananza ad una ad una.

Lo spazio intersiderale non è tuttavia interamente vuoto: un po' dovunque contiene tracce di materia, ed infatti in alcune regioni celesti ritroviamo fra le stelle, ora una nube diffusa, simile ad una vivida rete brillante, tessuta con indicibile grazia (Fig. 24), — ora una nube oscura e sinistra, che preclude allo sguardo la visione di quanto può esistere dietro di essa (Fig. 25). Questa nebulosità appare chiaramente solo in talune regioni eccezionali, ma non v'ha dubbio che una nube cosmica della medesima natura, sebbene piú tenue, si estenda dappertutto. Nelle due figure si manifestano appunto condensazioni di materia cosmica la cui densità è, qualche volta, mille o diecimila volte maggiore delle densità comuni. Tratteremo specialmente delle regioni normali, che si trovano cioè lontano dai luoghi di queste speciali condensazioni; che, a giudicare dalle fotografie, non dànno segno di presenza di materia; e denomineremo ''nube intersiderale'', o ''nube cosmica'', l'invisibile gas onde siamo avvolti, trovandosi il *Sole* e la *Terra* in una delle regioni normali dove lo stesso gas non si è condensato.

Fino a quasi sei anni fa, gli astronomi mancavano di prove sicure dell'esistenza di nubi interstellari; tuttavia negli ultimi quarant'anni se ne andava parlando di frequente. Può darsi che, offrendo ad un ospite di passare la notte in una camera che

dicano abitata dagli spiriti, egli esiti alquanto, e non già perché creda fermamente alla loro esistenza, ma perché ne ha paura. Similmente gli astronomi, a riguardo della nube interstellare: è probabile che pochi vi credessero, ma molti la temevano!

Essi potevano calcolare lo splendore effettivo delle stelle, ma dovevano ammettere che non fossero offuscate da una certa nebulosità. Del pari, potevano trarre interessanti risultati dallo studio dinamico dei moti stellari, ma occorreva escludere l'esistenza perturbatrice di un mezzo resistente. Ancora, potevano calcolare quale massa avrebbe dovuto possedere una stella per alimentare la provvista d'energia calorifica necessaria alla sua radiazione, ma bisognava essere certi che la stella medesima non acquistasse fraudolentemente della massa, a spese della materia circostante. In tal modo, la nube cosmica costituiva un *babau* minacciante la solidità delle teorie concernenti la struttura ed il meccanismo dei corpi celesti in rapida evoluzione; e se ne discuteva, non pure come d'un oggetto d'indagine, bensí per mera precauzione. Ma, presa consistenza, lo spauracchio ormai non spaventa piú nessuno: sappiamo che la nube cosmica è tanto rarefatta da non poter costituire un serio intralcio nei problemi cui si è accennato.

Doveva supporsi veramente molto improbabile che lo spazio interstellare si rivelasse affatto vuoto. Se, come crediamo, le stelle si sono formate per condensazione di una nebulosa primitiva, comprendente l'intero sistema stellare, è naturale che tuttora si debbano conservare tracce dell'originaria distribu-

zione diffusa della materia. «La natura ha orrore del vuoto»: dobbiamo credere che gli atomi, abbandonando le stelle e le nebulose, cerchino rifugio nelle regioni relativamente vuote, quasi come avviene della polvere che si accumula nelle stanze vuote dove non sia passata mai una scopa. È pur vero che una certa porzione dello spazio viene ripulita, giacché una stella attira a sé, per effetto della gravitazione, la materia circostante e cosí, spostandosi attraverso lo spazio, vi produce una specie di galleria. Questi spazzini d'eccezione sono tuttavia pochi, assolutamente insufficienti allo spazio su cui devono lavorare, ed infatti si calcola che per la pulizia del cielo occorrerebbero almeno diecimila bilioni di anni.

## TESTIMONIANZE DELL'OSSERVAZIONE

Vedremo subito come possa essere provata direttamente l'esistenza di una nube cosmica.

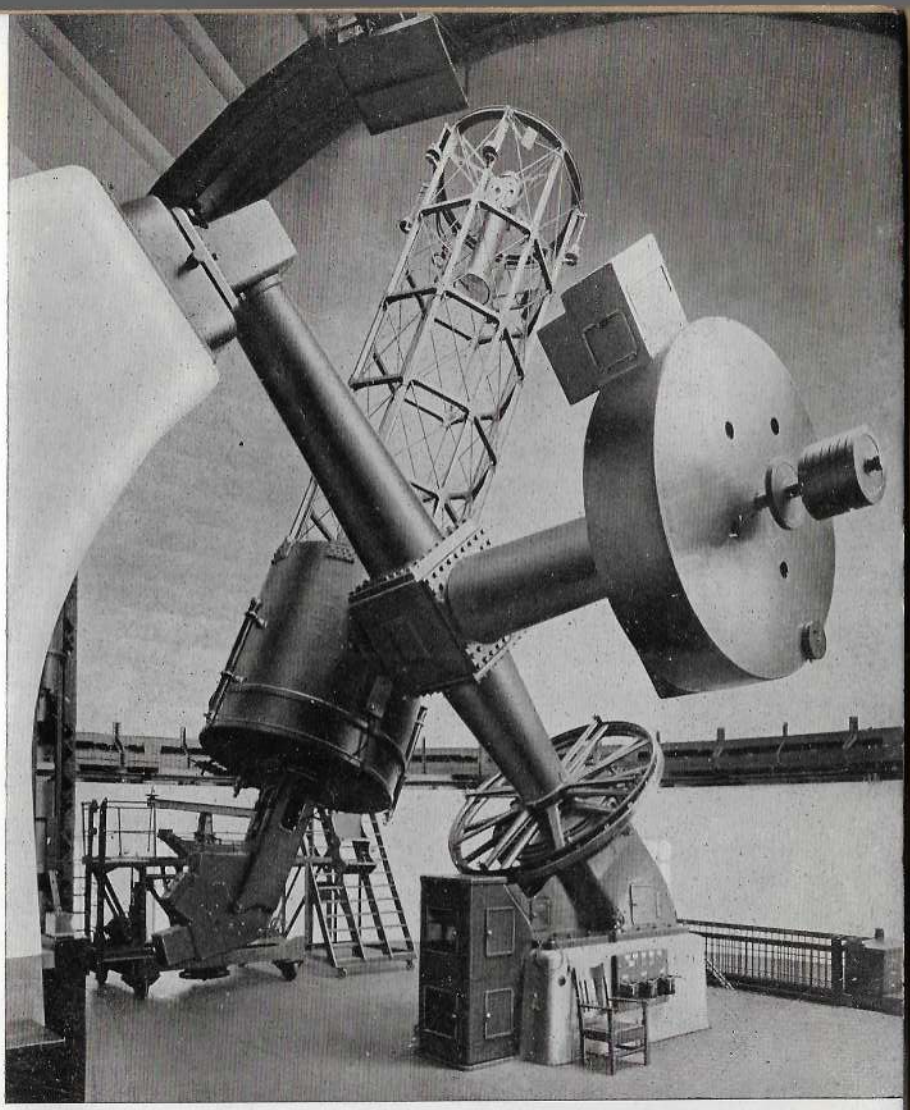
È risaputo che, quando la luce attraversa un gas, gli atomi vi lasciano i loro segni caratteristici, e però lo spettro della medesima luce, ottenuto mediante un prisma, manifesta un certo numero di sottili righe oscure. Le quali dichiarano la composizione chimica del gas, ma indicano altresí se esso si muova, e con quale velocità di avvicinamento o di allontanamento rispetto a noi. Osservando, ad esempio, uno dei lembi del *Sole*, vediamo le righe di un determinato

gas che si avvicina a noi; osservando il lembo opposto, vediamo quelle d'un gas che s'allontana. Orbene, che un lembo si avvicini e l'opposto si allontani, prova naturalmente la rotazione dell'astro; o meglio la conferma, essendo nota fin da quando GALILEO poté osservare lo spostamento delle macchie sul disco del *Sole* (Pagg. 52, 80). Ma nello spettro solare vi sono anche righe oscure le quali non segnalano alcun moto rotatorio: conservano la loro posizione comunque vengano osservate, e se al lembo orientale oppure a quello occidentale. Esse non possono certo appartenere all'atmosfera rotante dell'astro, e la loro origine va riconosciuta in un mezzo gassoso, attraversato dalla luce nel percorrere lo spazio compreso fra il *Sole* ed il nostro telescopio. Dobbiamo davvero registrare una scoperta sensazionale in questo gas, che è situato fra il *Sole* e il nostro strumento, e non si muove verso di noi né se ne allontana? Oh no! È scoperta già da parecchio acquisita, ché quelle righe spettrali appartengono all'ossigeno ed all'azoto, e perciò, sia pure indirettamente, non si è fatto altro che scoprire di nuovo la nostra atmosfera.

Risultati piú importanti si sono ricavati dall'applicazione dello stesso metodo alle stelle. L'effetto è stato prima osservato nella *Delta di Orione* (δ *Orionis*), una stella della "cintura" nella costellazione omonima (Fig. 26); stella doppia, di cui le componenti rivoluiscono rapidamente l'una intorno all'altra. Esaminando lo spettro, possiamo ricostruire l'orbita descritta nello spazio dalla componente piú brillante la quale va avvicinandosi a

noi per tre giorni e se ne allontana nei tre successivi, si avvicina di nuovo e via dicendo. Quasi tutte le righe oscure, e poiché si spostano periodicamente ora verso l'estremo violetto, ora verso l'estremo rosso dello spettro, rivelano questo moto orbitale; due larghe righe spettrali, che appartengono al calcio, restano invece fisse. La loro origine deve essere evidentemente diversa da quella delle altre; rivelandosi nella luce soltanto dopo che questa ha lasciato la stella, le righe dimostrano l'esistenza di un mezzo interposto fra la stella e il nostro telescopio; e stavolta è da escludere che si tratti della nostra atmosfera, perché questa non contiene vapori di calcio; e perché, in ogni caso, il moto da esse indicato è affatto diverso da quello che spetta alla atmosfera medesima.

La scoperta avvenne nel 1904, e da allora le righe fisse del calcio sono state osservate nello spettro di altre numerose stelle; di piú, sebbene meno frequentemente, è stata vista una riga fissa appartenente al sodio. Ma passarono molti anni prima di vedere favorevolmente accolta l'attuale interpretazione, prima cioè di ammettere la provenienza delle righe stazionarie da una nube cosmica. Invero, tutte le stelle ci appaiono attraverso uno strato piú o meno denso ed esteso d'una nube interstellare; perciò appunto, la luce degli astri reca non soltanto i segni dei propri atomi, ma anche di quelli della nube attraversata. Per motivi che ora non soddisferebbero piú, si soleva credere all'esistenza di un'aureola diffusa, costituita di calcio e di sodio, avvolgente tutto il sistema binario. Nell'interno di quest'aureola, le



* Fig. 26. — Riflettore di 183 cm. del *Dominion Observatory* di Victoria, nella Columbia britannica. Nella parte inferiore è situato lo spettrografo stellare.

Fig. 27. — La costellazione di Orione, fotografata dal nuovo obbiettivo di Ross.

(*Monte Wilson*)

componenti avrebbero dovuto spostarsi ora in un senso ora nell'altro; e mentre le righe proprie delle due stelle avrebbero manifestato il moto orbitale, le righe del calcio e del sodio, appartenenti all'aureola, non avrebbero partecipato del medesimo moto. Questa teoria poteva essere per altro provata a dovere; infatti, se l'involucro di calcio non avesse partecipato del moto di va e vieni della stella che vi si trova avvolta, tuttavia il suo moto medio, riferito ad un lungo periodo di tempo, avrebbe dovuto corrispondere a quello stellare, a meno di ammettere fatalmente una graduale separazione della stella dal supposto involucro.

Nel 1923 tutti i dubbi venivano sciolti in seguito alle profonde indagini che aveva eseguito il dott. J. S. Plaskett col riflettore di 183 centimetri (Fig. 27) della Columbia britannica (il maggiore telescopio dell'Impero inglese ed il secondo del mondo). Osservando una quarantina di stelle, il cui spettro manifestava queste righe fisse, il Plaskett scopriva notevoli differenze, talvolta molto pronunziate, fra la velocità media della stella e la velocità del calcio. Secondo l'interpretazione fino allora seguíta, ciò significava che le stelle si lasciavano indietro l'aureola. Era quindi chiaro dovesse risultare che il mezzo rivelato dalle righe fisse non poteva essere comunque legato alle stelle. Un altro fatto parimente significativo consisteva in ciò, che sebbene le stelle possedessero moti propri, taluni rapidi, altri lenti, si ritrovava il calcio sempre in quiete nello spazio; piú precisamente non in quiete rispetto al sistema solare — giacché il *Sole*, come ogni altra

stella, ha un moto proprio individuale —, ma in rapporto al sistema di riferimento piú generale costituito dalla ''media delle stelle''. Questo risultato, per cui il calcio manifesta, in qualunque direzione del cielo, un debole movimento relativo o non ne manifesta alcuno, conduce a far ritenere molto probabile che esso componga un'unica e medesima nube continua.

Ecco, per riassumere, esposta la prova principale che vien fornita dall'osservazione per consentirci di immaginare una nube di materia, pressocché immobile, la quale riempia l'intero sistema stellare, e contenga le stelle che vi rotolano in tutti i sensi. Raggi di luce partono da una stella lontana, percorrendo nel loro viaggio 300.000 chilometri al secondo; e come corrono gli anni, la sopravanzano, incontrano o sfiorano di tanto in tanto i radi atomi ond'è costituita la nube cosmica; questa vicenda dura, per duemila anni, finché la luce non abbia raggiunta la *Terra*. Qui e là, un atomo di calcio, od uno di sodio, si appropria qualcosa che appartiene ai raggi; e questi, finalmente, privi dei costituenti tolti agli atomi in tali incontri, giungono sino a noi, manifestando nel loro spettro le righe oscure, che guidano le ricerche degli astronomi.

Siccome al crescere del cammino della luce, il bottino che gli atomi raccolgono a sue spese deve farsi piú ricco, era da supporre che l'intensità (o ''grado di annerimento'') delle righe fisse del calcio ci desse la possibilità di misurare la distanza della stella. È merito appunto del dott. Otto Struve d'averla tentata e condotta in modo esaurientissimo,

riuscendo a dimostrare che la stessa intensità cresce notevolmente colla distanza.

Se la stella non dista piú di cinquecento anni-luce, lo spessore della nube che si trova interposta fra l'astro ed i nostri strumenti non è ancora sufficiente per potervi raccogliere tracce osservabili. Soprattutto per ciò, le righe fisse del calcio costituiscono un avvenimento eccezionale: la maggior parte delle stelle, che potremmo osservare nei particolari pel fatto d'essere abbastanza cospicue, sono troppo vicine a noi, e non ci mostrano le righe stazionarie. Invece, le stelle di intenso splendore intrinseco che riusciamo a scorgere negli spazî piú lontani, da mille a ventimila anni-luce, manifestano l'assorbimento dovuto alla nube di calcio, e si è trovato che, in generale, le righe piú intense corrispondono alle distanze maggiori. Non ci dobbiamo tuttavia aspettare una corrispondenza esatta, giacché la densità della nube non è uniforme; ad esempio, le nebulose sono luoghi di forte condensazione; anzi, dobbiamo dichiarare la nostra sorpresa, e quasi il nostro turbamento, nel riconoscere fra l'intensità e la distanza un cosí stretto legame reciproco.

L'esempio seguente, che si riferisce a questa relazione, è forse piú significativo d'una generale conferma statistica. Diciotto anni fa erasi scoperto che le stelle a temperatura elevata (di intenso splendore assoluto), comprese nella costellazione di *Perseo* e nelle sue vicinanze, potevano essere distinte, a riguardo dei loro moti apparenti, in due gruppi ben definiti; in primo piano, un ammasso di stelle muoventesi all'istesso modo con una velocità piuttosto

grande in rapporto al tipo stellare; dietro e lontano, stelle dotate di moti propri deboli o nulli. Questa distinzione costituiva un'ottima prova, giacché osservare ad un tempo l'uno e l'altro gruppo valeva come osservare la nube cosmica in una stessa direzione, e quindi avere minori probabilità di cadere negli eventuali errori dovuti all'irregolare densità della nube. Ebbene, le righe fisse del calcio si manifestavano, come appunto vogliono le nostre ipotesi, piú intense per le stelle retrostanti che non per le altre.

Perché mai troviamo soltanto calcio e sodio? Escluso per un momento che la nube cosmica sia costituita interamente, o quanto meno prevalentemente, di calcio e sodio, possiamo aspettarci di trovarvi tutti gli elementi ordinari press'a poco nelle medesime proporzioni terrestri, come appunto sembrerebbe in qualche modo provato. Che vi si trovino, in altre parole, tutti gli altri elementi, ma facciano mostra di sé soltanto il sodio ed il calcio. Deve ricordarsi (Pag. 70) che all'astronomia, sebbene essa fornisca molti ragguagli sulla chimica dei corpi celesti, non sono consentite le comodità che soccorrono il chimico nel suo gabinetto di analisi. Ove esamini un campione di saggio, ricercando un dato elemento, egli potrà far sí che l'analisi si compia nelle condizioni di temperatura e di eccitabilità piú convenienti alla produzione dello spettro dell'elemento cercato. L'astronomo, invece, deve adattarsi alle condizioni naturali che gli si presentano e, se sono sfavorevoli alla formazione dello spettro d'un dato elemento, rinunziare ad avere notizie dell'elemento medesimo. Scorrendo la lista degli elementi chimici, possiamo

convincerci senz'altro che il calcio ed il sodio sono i soli elementi i quali si trovino in sufficiente abbondanza e, nelle condizioni regnanti nello spazio interstellare, possano produrre uno spettro osservabile. Non è davvero un caso che la nube cosmica si riveli mediante tre caratteristiche righe spettrali: queste, e non altre, potrebbe produrre la materia avente la medesima composizione media del nostro pianeta, ma allo stato d'una nube diffusa.

L'astronomo ha il piú forte ostacolo in ciò, che tutti gli spettri celesti cessano bruscamente alla lunghezza d'onda di 300 unità ANGSTROEM (cioè tremila decimilionesimi di millimetri), dal quale punto crediamo comincerebbero ad essere davvero interessanti e fecondi per le ricerche del fisico sperimentale. La causa di tale arresto, o assorbimento, va ricercata in uno strato d'ozono che si trova nelle regioni superiori della nostra atmosfera. Come lo strato di HEAVISIDE impedisce alle onde lunghe delle radiotrasmissioni di uscire dall'atmosfera, cosí, e per un numero d'ottave molto maggiore nella scala delle lunghezze d'onda, lo strato d'ozono impedisce di penetrarvi alle corte onde ultraviolette emesse dalle stelle. In tal modo gli astronomi, come coloro che volessero udire un pezzo musicale ad un altoparlante capace di trasmettere soltanto le note basse, non percepiscono le note acute del canto degli atomi stellari. Quelle del sodio e del calcio, note basse di petto, son le sole che si possano udire.

## DENSITÀ DELLA NUBE COSMICA

Volgendoci ora a considerazioni le quali si riferiscono meno direttamente all'osservazione, cercheremo di farci un'idea della densità della nube cosmica. Con argomenti di varia indole si riesce a provare che la nube è estremamente e, potrebbe anche dirsi, inconcepibilmente rarefatta. Fra essi, uno si basa sulla teoria di EINSTEIN. Secondo questa, data una materia di determinata densità, le dimensioni dei globi che potrebbero essere formati colla materia stessa non dovrebbero superare certi limiti; sarebbe affatto impossibile, ad esempio, l'esistenza di un globo d'acqua con un diametro di piú di 650 milioni di chilometri. Varrebbe la pena di spiegarne il perché, ma è pur vero che la maggior parte delle spiegazioni contengono piú interrogativi della domanda cui si vuole rispondere; e non darà motivo a sorpresa che la nostra spiegazione, apparentemente alquanto strana, riesca meno credibile della proposizione da cui partiamo, pur corrispondendo ad un calcolo teorico non complicato. Secondo la legge di gravitazione einsteiniana, la materia determina la curvatura dello spazio da essa occupato. Se, cioè, cerchiamo di agglomerare in un blocco un'eccessiva quantità di materia, lo spazio di necessità si incurva, tanto da chiudersi su se stesso. Questo appunto avviene all'enorme globo d'acqua: appena il diametro ha raggiunto i 650 milioni di chilometri, lo spazio gli si chiude intorno stretta-

mente, né si riesce ad aumentarne le dimensioni, giacché non rimane spazio per poter aggiungere altra acqua. Tutto lo spazio è compreso nella sfera e, per ciò, di là da questa non v'è piú spazio. È tuttavia certo che, secondo i suggerimenti del calcolo, tutto avvenga come se fosse cosí; ma la nostra mente non possiede l'elasticità necessaria per comporne un'immagine sensibile, ed ogni nostro tentativo sarebbe al proposito vano.

Con materia di densità inferiore si potrebbe costruire un globo ancora piú grande; è però evidente che il gas cosmico debba avere una densità molto bassa, se costituisce un globo almeno tanto grande da contenere l'intero sistema stellare attraverso cui, come supponiamo, si estende il gas. Posta questa condizione, la densità deve essere inferiore a $10^{-18}$, cioè al trilionesimo della densità dell'acqua.

Il limite si abbassa ancor piú, ove lo si deduca dalle velocità che l'osservazione assegna alle stelle. Poiché, al crescere della quantità di materia gravitazionale nel sistema siderale, crescono altresí le forze d'attrazione agenti sulle stelle, di conseguenza dovrà anche elevarsi la media delle loro velocità. Seguendo appunto questo criterio arriviamo ad ammettere che la densità della nube cosmica non superi in ogni modo il limite di $10^{-23}$. Pur essendovi limiti anche piú bassi, è probabile che il numero anzi detto non si scosti molto, per eccesso, dalla densità reale.

Una valutazione precisa può essere nondimeno ottenuta mediante un argomento connesso al graduale, insensibile formarsi delle nebulose dalla nube co-

smica universale, di cui appunto esse non sarebbero se non condensazioni. Quali elementi di calcolo intervengono tanto la temperatura della nube (valutata con un metodo che verrà esposto piú innanzi) quanto la distanza media fra le varie condensazioni, cioè fra le nebulose; ed il risultato appare abbastanza degno di fede, non essendo eccessivamente soggetto alle incertezze che accompagnano i nostri dati. Questo risultato s'avvicina a $10^{-24}$: la densità della nube cosmica è, cioè, un quadrilionesimo di quella dell'acqua.

A malgrado della sua tenuissima densità, ma in conseguenza della sua enorme estensione, la nube cosmica accresce notevolmente la massa dell'Universo: la massa totale della nube è infatti all'incirca la metà di quella risultante dall'insieme di tutte le stelle. Possiamo dire, cioè, che tutta la materia dell'Universo è per quasi due terzi condensata a formare le stelle ed il terzo non condensato si trova diffuso nello spazio; la quale proporzione vien fatta ritenere probabile dalla teoria della condensazione della nebulosa primitiva.

C'è veramente da stupire ad esprimere i dati concernenti la densità mediante il numero degli atomi che vi deve corrispondere. Se la densità è di $10^{-24}$, ciò significa, infatti, che v'è un atomo per ogni sedici centimetri cubi: nella profonda solitudine dello spazio interstellare, lungi da tutte le oasi di materia, è possibile incontrare un atomo alla distanza di 25 millimetri dall'altro. Volendo cosí affermare la estrema rarefazione della nube, è invece probabile ci sia riuscito soltanto di suscitare quest'immagine

affatto diversa: che si tratti d'un assembramento di atomi, denso come uno sciame di moscerini. Immagine certo esatta; ma va ricordato come un atomo sia la piú piccola quantità di materia che possiamo concepire. Riempiamo di liquido un bicchiere e supponiamo di poter contrassegnare tutti gli atomi che vi sono contenuti in modo da poterli riconoscere quando vogliamo. Versiamo quindi il liquido in mare, aspettando che gli atomi si distribuiscano uniformemente negli oceani che si estendono sul nostro pianeta. Ciò fatto, riempiamo di nuovo il bicchiere con acqua marina attinta ad un qualsiasi lido: vi ritroveremo una dozzina di quegli atomi contrassegnati. Certo son vere le parole di Macbeth:

«Potrà l'intero oceano del gran Nettuno lavare questo sangue — e pulire la mia mano? No. Io temo invece ch'essa — tingerà di vermiglio i mari innumerevoli.» [1]

Occorrerà che una boccata di fumo di pipa riempia, espandendosi, un cubo cogli spigoli di 16 chm. perché la sua densità si riduca a quella della nube interstellare. Una nube cosmica grande quanto la *Terra* potrebbe essere contenuta in una valigetta ben maneggevole. Gli atomi della nube vi si muovono a caso come se giocassero a mosca

---

[1] *Will all great Neptune's Ocean wash this blood — Clean from my hand? No, this my hand will rather — The multitudinous seas incarnadine.* (SHAKESPEARE, *MACBETH*, Atto II, Scena 3ª.)

cieca; ma data la loro minuscola statura si urteranno a vicenda molto raramente. Un atomo, avanzando diritto per la sua strada, ne potrà in media incontrare un altro solo dopo un anno, e nel frattempo avrà percorso una distanza uguale a quella che separa la *Terra* dal *Sole*. Vi sono anche elettroni liberi erranti alla ventura nella nube, e con essi gli atomi possono scontrarsi all'incirca ogni cinque giorni; ma poiché gli elettroni hanno massa piccolissima, nella sua corsa l'atomo non ne viene disturbato in misura apprezzabile.

## L'ELEVATA TEMPERATURA DELLA NUBE

Può sembrare davvero paradossale che la nube cosmica sia intensamente calda. È invero certo che spesso sentiamo attribuire allo spazio interstellare temperature bassissime; e non a torto se, di là da una certa distanza dal *Sole*, la temperatura d'un solido o liquido discende a −270° C., cioè a 3 gradi sopra lo zero assoluto. Questa sarebbe appunto la temperatura registrata da un termometro, corrispondendo al grado di freddo che sentirebbe un corpo umano, ove in tali condizioni gli si potesse ancora riconoscere un residuo di sensibilità. La nube diffusa, ed appunto perché diffusa, riesce tuttavia a mantenere il caldo sotto le medesime condizioni.

Attraverso lo spazio c'è una certa quantità di calore irradiato dalle stelle. Gli strumenti per la mi-

sura del calore sono oggi tanto sensibili da poter rivelare con la massima facilità il calore proveniente da *Sirio* od *Arturo* e persino da stelle meno brillanti. Tutte le stelle, naturalmente escluso il *Sole*, forniscono nel loro insieme tanto calore quanto una candela situata all'incirca a 90 metri. Può darsi che taluno ritenga si tratti d'una piccola quantità; per noi essa è all'opposto insperatamente grande, tenuto conto delle enormi distanze alle quali si trovano le stelle che ce le inviano. È tuttavia chiaro che non basterebbe certo a far piú miti i nostri rigidi inverni: se qualcheduno immaginasse di trovarsi nello spazio esterno al sistema solare, ed esposto al calore di una candela situata a 90 metri, comprenderebbe di certo perché le condizioni siano tanto rigide. Naturalmente, se il corpo umano potesse di minuto in minuto immagazzinare il calore inviato dalla candela, finirebbe col divenire caldo; ma la materia allo stato solido è costituita in tal modo da dissipare, o irradiare di nuovo, molto rapidamente il calore; e quando abbia raggiunto i 3 gradi assoluti, la perdita di calore è tanto rapida da non poter essere piú compensata dal riscaldamento.

La ragione del fatto per cui il gas cosmico raggiunge una temperatura piú elevata consiste in ciò, che il gas medesimo ha meno frequenti occasioni di perdere il calore, comunque attinto. Il calore (Pag. 5) altro non è se non energia di moto degli atomi e delle molecole della materia muoventisi qui e là in tutte le direzioni; e l'energia di moto ha maggiori probabilità di perdersi, e di essere quindi irradiata lontano, durante le collisioni. Orbene, quando la materia è

allo stato solido, gli atomi collidono quasi continuamente; e, perfino in un gas dell'ordinaria densità terrestre, ogni atomo subisce milioni di urti al secondo. Nella nube cosmica, invece, dove le collisioni si producono all'incirca una volta all'anno, questa causa di perdita può essere in pratica ritenuta non efficiente.

Ma il segreto dell'alta temperatura della nube non risiede tutto nelle condizioni anzi dette, ed ove si elimini la circostanza degli urti, la nostra spiegazione ne esce fuori ben mutilata. I fenomeni in virtú dei quali un corpo perde calore, infatti, sono sempre strettamente associati a quelli per cui ne acquista: gli urti pei quali la materia allo stato solido dissipa del calore sono parimente utili, in quanto permettono ai solidi l'assorbimento del calore che proviene dalle stelle.

Immaginando che tanto una meteorite solida quanto una porzione di nube cosmica siano davanti ad una candela situata alla distanza di circa novanta metri, non è facile vedere subito quale delle due riuscirebbe meglio a riscaldarsi. La meteorite, assorbendo tutto il calore che le arriva, lo disperderebbe altresí subito; la nube diffusa, invece, conserverebbe tutto il calore che potesse mirare a prendere; ma non ha il dispositivo adatto per assorbirlo; di fatto, la nube è trasparente al piú del calore dal quale viene attraversata. I vantaggi e gli svantaggi cosí si fanno equilibrio: però la meteorite e la nube raggiungerebbero entrambi la medesima temperatura di 3 gradi sullo zero assoluto. Questo tuttavia non avviene, e ne intendiamo la ragione. V'è un processo

che, potendosi svolgere liberamente, fa elevare la temperatura fino ad un valore prossimo a quello della temperatura superficiale delle stelle piú calde. Il processo vien d'ordinario sopraffatto dagli scambi di calore, molto piú rapidi di quelli che si producono durante gli urti atomici. Nella nube cosmica, gli urti sono quasi trascurabili, e quindi il processo attenuato può diventare preminente ed assumere il controllo della temperatura.

Questo processo, cui va attribuita la causa dell'elevata temperatura della nube cosmica, consiste appunto nella ionizzazione degli atomi, cioè nello allontanamento di alcuni degli elettroni piú esterni i quali vengono strappati all'atomo. Seguiamo un atomo che viaggia attraverso lo spazio interstellare. Per la maggior parte del tempo esso si muove tranquillamente, senza badare alla luce ed alle onde calorifiche che provengono dalle stelle, e lo incontrano o lo raggiungono. Ma, di tanto in tanto, e non certo piú d'una volta al mese, forse colpito dalle onde in un punto sensibile, l'atomo le ghermisce bruscamente e parzialmente fa propria la loro energia. È risaputo che quando un atomo si dà a queste avventure non può appropriarsi l'energia né in piú né in meno di una certa quantità ben definita in rapporto ad una data frequenza d'onda, e denominata ''quanto''. Il ''quanto'' è proporzionale alla frequenza in tal modo che, poniamo, un quanto di luce blú è una quantità di energia maggiore di un quanto di luce rossa. Per riferire una immagine familiare ai radioamatori, senza dubbio iniziati ai misteri dei kilocicli, diremo che il quanto di onde elettriche

della stazione trasmittente 2 LO è maggiore del quanto relativo alle onde emesse da 5 XX; e ciò perché 2 LO utilizza una frequenza piú elevata.

Lo spazio interstellare viene solcato da onde di varia frequenza. Se l'atomo raccoglie un quanto di frequenza moderatamente bassa conserva facilmente la sua energia. In tal caso, l'atomo trattiene l'energia per una frazione di milionesimo di secondo, e poscia la versa di nuovo nell'etere. Ma, talvolta, l'atomo inghiotte un quanto di alta frequenza, sproporzionato alle sue possibilità di contenerlo. Perciò esplode, e uno dei suoi elettroni periferici l'abbandona a rapida velocità, ricco dell'eccesso d'energia che non aveva potuto trovar posto nell'interno dell'atomo. L'elettrone cosí liberato sopravanza il suo atomo, allontanandosene sempre piú e sfiorando di quando in quando gli atomi che si trovano sparsi lungo il suo cammino. Dopo una vita media di parecchi mesi, cade nella rete di qualche altro atomo con la crinolina elettronica incompleta, e cosí finisce la sua libera corsa.

In tal modo, nella nube cosmica si va producendo continuamente, ed al medesimo tempo assorbendo, un gas elettronico. È da rilevare che questo vien generato ad alta temperatura, in conseguenza della grande violenza con cui gli elettroni sono espulsi dagli atomi. Se una qualunque causa tende a far perdere il calore agli elettroni liberi, le possibilità offerte a quella causa, di riuscire nell'operazione, diminuiscono, giacché gli elettroni i quali abbiano subíto una simile perdita vengono di continuo catturati e sostituiti con altri, espulsi di recente. Se il gas

cosmico è inizialmente freddo, gli elettroni cercheranno di portarlo alla temperatura propria, mentre gli atomi cercheranno a loro volta di ricondurre il gas elettronico alla loro temperatura. Ma in questa vicenda, i vincitori sono gli elettroni, ché tornano continuamente a prendersi piú energia da trasferire agli atomi, e questi, come abbiamo visto, sono per altro privi dei mezzi normali adatti all'emissione di energia, in conseguenza dei pochissimi urti.

La caratteristica di questo processo di riscaldamento consiste in ciò, che è affatto indifferente la distanza della sorgente calorifica. Per una proprietà sperimentale, che è fra le piú notevoli della luce (o onde elettromagnetiche), comunque essa sia fatta piú debole a causa della distanza, le esplosioni atomiche da essa provocabili avvengono con la stessa violenza. Ogni esplosione corrisponde ad un quanto di energia, cioè ad una quantità dipendente dal colore o dalla frequenza della luce, ma affatto indipendente dalla sua intensità. Poiché, ove la luce sia indebolita, diminuisce di necessità il numero delle esplosioni ma non la violenza, ne consegue che il gas elettronico vien generato alla medesima temperatura sia nelle profondità dello spazio, sia in prossimità della superficie delle stelle. Il gas cosmico raggiunge cosí una temperatura pressocché uguale a quella regnante alla superficie delle stelle. Devesi ancora aggiungere che le stelle piú calde influiscono piú di tutte a determinare la temperatura della nube. Di fatto, nelle vicinanze del *Sole*, la nube è eccezionalmente fredda giacché il nostro astro non è invero

fra le stelle piú calde: i suoi raggi provocano innumerevoli, deboli esplosioni, ed esso inonda cosí il mezzo circostante di elettroni relativamente lenti. È davvero strano che i medesimi raggi solari, onde si riscalda la materia allo stato solido, passino come un vento glaciale sulla materia diffusa della nube cosmica.

## PROVE DELLA TEORIA

Riassumiamo a questo punto i risultati finora raccolti. Siamo partiti dalla prova fornitaci direttamente dall'osservazione, dell'esistenza di una nube interstellare alla quale devonsi attribuire le righe fisse del calcio e del sodio osservate negli spettri delle stelle lontane. Abbiamo quindi considerato il problema in diverso modo, per concludere, facendoci guidare da considerazioni teoriche affatto indipendenti, che la densità normale della materia interstellare deve corrispondere ad un atomo per ogni sedici centimetri cubi e la sua temperatura a 15 mila gradi centigradi.

Occorre ora connettere questi due risultati e, in particolare, vedere se le righe del calcio e del sodio, quali si osservano, abbiano quel carattere e quell'intensità che dovrebbero avere per poter essere prodotte veramente dalla nube. All'uopo, esamineremo lo stato in cui si trovano gli atomi di calcio. Abbiamo pur visto che gli atomi espellono continua-

mente degli elettroni i quali, non appena in libertà, sono soggetti ad essere catturati, una volta o l'altra, nel corso del loro lungo cammino. Vi sarà tuttavia un momento in cui se ne potranno trovare alcuni in vacanza. Quanti? Siccome il calcio è un elemento bivalente, cioè con due elettroni a legame piú labile degli altri, si può ritenere che questi due elettroni debbano, nelle condizioni interstellari, annoverarsi generalmente fra gli assenti.

L'atomo di calcio privo di due elettroni non opera un assorbimento osservabile: il suo spettro compare tutto nella regione dell'ultravioletto. È quindi sottratto all'osservazione, per effetto dell'assorbimento dovuto allo strato d'ozono della nostra atmosfera; e però molti degli atomi di calcio della nube non possono contribuire alla produzione delle righe spettrali fisse. Gli atomi di calcio che producono le righe stazionarie sono quelli mancanti di un solo elettrone e di essi se ne trova uno ogni ottocento. Quelli col corteo elettronico completo sono immensamente piú rari; cioè, all'incirca 1 su 50 milioni; e cosí appunto si spiega che nello spettro della nube non si osservino le righe appartenenti all'atomo di calcio completo, cioè elettricamente neutro.

Il calcio è in genere un elemento molto diffuso in natura e costituisce piú dell'uno per cento della massa totale del nostro pianeta. Ammesso che questa proporzione si ripeta nella nube, e che solo l'un per ottocento del calcio intervenga attivamente alla produzione del fenomeno d'assorbimento osservato, per ogni tre quarti di metro cubo di spazio interstellare, all'incirca, vi dovrà essere un atomo di calcio attivo.

Eccoci ora alla prova. Osservando una stella qualsiasi, la vediamo attraverso uno schermo contenente un atomo attivo per ogni tre quarti di metro cubo e dello spessore pari alla distanza della stella, poniamo mille anni-luce. Qual è l'assorbimento che potrebbe produrre un simile schermo? È domanda alla quale ritiene di poter rispondere la moderna fisica atomica, annunziando una ben definita intensità delle righe oscure dello spettro. Esaminando le righe fisse del calcio nello spettro delle stelle che sappiamo distanti mille anni-luce, potremo provare se l'intensità prevista corrisponda a quella reale. Si tratta di prova difficile, date le difficoltà delle misure della densità e del grado di ionizzazione, e non ci meraviglieremmo se i nostri risultati fossero soggetti ad un errore tale da decuplicare le cifre. Ma, per fortuna, l'accordo fra la previsione e l'osservazione è ben piú soddisfacente di quanto forse ci aspetteremmo.

Il felice esito delle nostre prove in rapporto al calcio viene tuttavia turbato in conseguenza del disaccordo, difficilmente spiegabile, che si manifesta in rapporto alle righe del sodio. Le righe del sodio osservate sono infatti molto piú intense di quelle del calcio, ed in proporzione maggiore di quella supponibile, tanto da renderci difficile resistere all'impressione che il sodio abbondi relativamente nella nube cosmica, piú che non nel globo terrestre. Forse ciò avviene perché il sodio è un elemento meno complesso del calcio, e perché l'evoluzione delle forme complesse di materia, da quelle piú semplici, non ha potuto svolgersi a sufficienza nelle condizioni primitive della nube interstellare; ma trattasi di

questione affatto nuova, ed è lungi da noi il proposito di far ritenere definitivi i risultati di cui s'è data notizia. Abbiamo solo voluto additare la strada che la ricerca scientifica percorre coll'intento di progredire; indicare come possano essere seguíti taluni sentieri appena accennati; rivelare, infine, le varie linee d'attacco, che convergono a mano a mano verso l'esatta definizione dello stato e della costituzione della nube cosmica.

## ACCRESCIMENTO ESTERNO DELLE STELLE

Avanzando nella nube cosmica, una stella, per effetto della gravitazione, deve raccogliere le particelle incontrate lungo il suo percorso e nelle vicinanze. Quest'accrescimento è di notevole importanza? Se sí, le nostre teorie sull'evoluzione stellare ne verranno modificate profondamente, giacché le stelle aumenterebbero via via di massa e, alla stregua della relazione fra massa e splendore, ormai ben stabilita, dovrebbe anche crescere il loro splendore. Ma, a fronte di quest'acquisto di massa, bisognerà anche elencare tutte le perdite. Grande preponderanza sulle altre ha la perdita di massa dovuta all'irradiazione, giacché la luce e il calore emessi da una stella sono dotati di massa, e però alla loro emissione deve corrispondere un lento, progressivo esaurimento della materia stellare. Quindi, se le perdite che cosí si verificano superano gli acquisti, si avrà

un'evoluzione a ritroso e, col tempo, corrisponderanno alle stelle una massa sempre piú piccola ed uno splendore piú debole.

Di regola, la perdita di massa per radiazione supera di parecchio l'accrescimento dovuto alla nube cosmica. Questa è tanto tenue che non può davvero rovesciare il senso dell'evoluzione, sicché, per quanto si riferisce a questo problema, non v'è nulla da temere da parte dello spauracchio che pareva minacciasse la solidità delle conclusioni generalmente ammesse. Ciò nonostante, bisogna considerare piú profondamente le stelle che, a causa di circostanze eccezionali, possono subire un accrescimento davvero molto rilevante, e vanno meglio ricercate nelle regioni piú dense della nube, cioè nelle sue condensazioni le quali ci appaiono come nebulose. È inoltre da credere che l'accrescimento maggiore tocchi alle stelle trovantesi in rapporto alle nebulose quasi in quiete, se è vero il proverbio che « sasso che rotola non fa muffa ». Ove una stella voglia far avvicinare a sé della materia situata a grande distanza, dovrà naturalmente attendere che questa materia le arrivi: non accontentarsi di fare una cattura da una parte, per saltare quindi lontano in qualche altra parte dell'Universo, prima di aspettare la risposta. Crediamo costituisca parimente un non trascurabile elemento il sapere se la velocità della stella attraverso la nebulosa sia o no inferiore alla velocità del suono. Forse sembrerà piuttosto strano parlare di velocità del suono in una nebulosa; ma se delle onde di condensazione e di rarefazione possono propagarvisi, non v'è ragione per ri-

nunciare all'uso del termine usuale. Le stelle che si trovano permanentemente nell'interno d'una nebulosa si muoveranno secondo date orbite, sotto l'azione attrattiva della massa della nebulosa, e si può dimostrare che, fino a quando non s'allontanano dalla parte centrale di essa (ove la densità non sia inferiore a un quinto della densità centrale), la loro velocità orbitale è inferiore alla velocità del suono.

Le stelle situate intorno al centro saranno quindi in condizioni straordinariamente favorevoli per raccogliere la materia cosmica, ed è probabile che almeno le piú piccole di esse subiscano un accrescimento maggiore della perdita da attribuire all'irradiazione. Il loro aumento di massa rovescia cosí il senso dell'ordine evolutivo normale; ma se la massa aumenta, crescono altresí le perdite per irradiazione, ed è quindi presumibile, che la stella non aumenti piú quando la massa raggiunga il valore corrispondente ad un esatto equilibrio fra perdita e guadagno. Questo è certo un modo molto ipotetico di pensare, e non potremo insistervi troppo. Tuttavia non è senza significato che l'osservazione ci abbia fatto riconoscere una classe di stelle di massa molto rilevante, animate di velocità eccezionalmente basse; e che tali stelle siano specialmente frequenti nelle nebulose brillanti, cosí da farci venire in mente che le medesime stelle abbiano potuto accrescere, o per lo meno conservare, la loro considerevole massa, a spese della nube cosmica.

Piú d'un secolo fa, i già potenti telescopi di Sir William Herschel cominciavano a rivelarci la gran-

diosità delle nebulose e a suscitare le nostre meraviglie. A queste scoperte certo deve essersi ispirato John KEATS che cantava:

« Quand'io m'incanto al volto stellato della notte — per gl'immensi simboli nebulosi d'un profondo romanzo, — sento che non potrò mai vivere tanto da disegnarne l'ombre colla magica mano della sorte. » [1]

Alcune di queste nubi si sono rivelate quali universi insulari di miriadi di stelle, che noi scorgiamo sospese negli abissi dello spazio e del tempo, giacché la luce che racconta la loro storia ha viaggiato per milioni d'anni prima di giungere fino a noi. Altre si sono risolte in numerosi campi gassosi che si estendono nel nostro sistema solare e che, eccitati dalle radiazioni delle stelle contenutevi, brillano d'una luce che ancora non siamo riusciti a produrre sulla *Terra* e tuttavia non è se non radiazione emessa dagli atomi d'ossigeno ed azoto, come da aria ordinaria; atomi i quali, dopo aver subíto gli incessanti bombardamenti e gli urti che ricorrono anche nelle esperienze terrestri, si sono tuffati nelle solitudini dello spazio. Noi non abbiamo considerato questa parte del romanzo. Ma abbiamo scorto le loro ombre misteriose, le sottili righe oscure che popo-

---

[1] *When I behold upon the night's starred face, — Huge cloudy symbols of a high romance, — And fell that I may never live to trace — Their shadows, with the magic hand of chance.* KEATS, Sonetto XXXVI.)

lano lo spettro delle stelle osservate attraverso il velo della nube.

Perciò abbiamo riconosciuto che le nebulose si prolungano molto di là dai loro limiti apparenti e si fondono in una sottile nebbia, estesa attraverso tutto il nostro universo insulare. Coll'immaginazione vediamo un formicolio d'atomi, quasi come un volante sciame di minutissimi ditteri, là dove pur supponevamo il vuoto assoluto. E, cosí intenti, pensiamo che questa nube sia un resto inutilizzato del caos originario, donde scaturirono le stelle, il *Sole*, la *Terra*, gli esseri viventi e la materia che ci circonda.

## V

# L'ESPANSIONE DELL'UNIVERSO

Velocità di allontanamento e distanze delle nebulose spirali – Nebulose che si avvicinano – Meccanismo dell'espansione – Attrazione e repulsione cosmica.

Quest'argomento stimola da qualche anno anche la curiosità dei profani, ma raramente è stato oggetto di divulgazione per il nostro pubblico.

Esso concerne insieme l'astronomia, la teoria di relatività e gravitazione come pure le nuove meccaniche secondo le quali ai corpuscoli costituenti l'atomo si accompagnano sempre delle onde; e cercheremo di esporlo con la massima semplicità possibile, riassumendo una conferenza tenuta da A. S. Eddington alla *Physical Society*.

Il riassunto è alquanto libero e tiene conto, in sostanza, del solo aspetto astronomico del problema, mentre trascura gli altri per mantenersi al livello di chiarezza dei precedenti scritti del volume. L'espediente non è nuovo né, forse, condannabile; ma chi non se ne soddisfa consideri che la divulgazione ha spesso per attributo necessario la reticenza.

Cominceremo dal dire che si tratta dell'Universo materiale, comprendente tutti i corpi del sistema solare cui appartiene la *Terra*, tutti quelli della

*Via Lattea* — sistema del quale fa parte il sistema solare —, tutte le nebulose situate di là dalla nostra *Galassia;* per dire meglio: l'insieme di tutti i corpi celesti esistenti nello spazio universo.

Ebbene, l'Universo si dilata: va espandendosi come la bolla cui lo rassomigliava Francesco BACONE ammonendo quanto sia breve la vita umana. E le proporzioni del fenomeno se son tali da non potere allarmare l'uomo comune non lasciano indifferenti gli scienziati.

Invero l'Universo avrebbe oggi un raggio doppio di quello di 1300 milioni di anni fa, quando si formarono le prime rocce del nostro pianeta; ma non c'è da preoccuparsene, poiché se l'immagine della bolla che si gonfia allude alla possibilità di vederla scoppiare, quest'evento appartiene a un lontano passato e non potrebbe ripetersi se non in un'epoca futura altrettanto lontana.

## ALLONTANAMENTO ED AVVICINAMENTO DELLE NEBULOSE SPIRALI

La figura 28 è una fotografia della nebulosa spirale *N. 33* nel *Triangolo*, simile alla *Grande Nebulosa* o nebulosa di *Andromeda* visibile pallidamente anche ad occhio nudo nella costellazione omonima. Le ''nebulose spirali'' in genere, ma non di necessità, sono della forma di queste, ed hanno tutte in comune l'essere situate nello spazio esterno alla nostra *Galassia*. La quale ha probabilmente la stessa forma, ma non possiamo accertarlo giacché

la si vede dall'interno come un disco appiattito, estendendosi su un piano segnato dalla traccia singolare della *Via Lattea,* il vasto e opalescente fiume notturno (Pag. 118).

Verso le estreme regioni celesti che i nostri telescopi possono frugare, lo spazio è appunto seminato da una moltitudine di queste nebulose, in gruppi o sole, sí da suggerire l'immagine, rispettivamente, di sterminati arcipelaghi o di ''universi-isola'', come anche le chiamano. Quanto lontane, queste isole che ammontano certo a varî milioni! E come scoprirne gli eventuali moti? Alla stessa guisa che per le stelle ci sovviene lo spostamento verso il rosso (Pag. 61) delle righe del loro spettro continuo: esso indica un moto nella direzione, meglio lungo la nostra visuale, del corpo dal quale proviene la luce di cui si esamina lo spettro, e permette altresí di misurare la velocità del moto stesso. I primi contributi a dette determinazioni sono dell'astronomo V. M. SLIPHER dell'Osservatorio di Flagstaff; mentre le stelle hanno velocità radiali, cioè lungo la visuale, fra i 10 e i 50 chilometri, le nebulose spirali si spostano con velocità dell'ordine del migliaio di chilometri al secondo, spettando ad una nebulosa nella costellazione dei *Gemelli* quella massima di 25 mila chilometri al secondo, press'a poco pari alla velocità di una particella *alfa.*

Le abbiamo dette lontanissime, le nebulose spirali. Ma quanto? Il lettore ricorderà (Pagg. 108-19) l'esistenza delle variabili del tipo delle *Cefeidi*: stelle di importanza caratteristica e provvidenziale poiché hanno la virtú di servirci quali ''candele-campione'';

e cosí, nota la loro grandezza e noto il periodo regolare di variazione dello splendore, dichiarano la distanza propria e della regione celeste da cui irradiano luce. E. P. HUBBLE dell'Osservatorio di Monte Wilson poté appunto scoprire stelle di questa specie in due o tre delle nebulose piú vicine, fra cui quella di *Andromeda*: breve il passo, quindi, per misurare la distanza delle nebulose stesse; e gran fortuna sarebbe stata per queste ricerche la scoperta di *Cefeidi* anche nelle nebulose piú lontane. Se la nostra *Galassia* contiene da 5 a 50 mila milioni di stelle; se l'Universo veramente ripete le sue forme e non conosce privilegi strutturali, i telescopi futuri potrebbero forse vedere occhieggiare cento, cinquanta *Cefeidi* nelle lontanissime Galassie: ma per ora nulla. E bisogna accontentarsi per le nebulose non molto vicine di altri metodi meno sicuri, i cui risultati son da noverare non fra le misure effettive ma fra le stime, tuttavia utili a scopi statistici. *Grosso modo:* le nebulose piú vicine distano all'incirca un milione di anni-luce, la piú lontana finora raggiunta dai nostri telescopi ci narra la storia dei suoi giorni di centocinquanta milioni di anni or sono!

Or ecco, confrontando le anzi dette velocità e distanze delle nebulose spirali, le conclusioni appaiono piuttosto strane: non solo le velocità sono molto piú elevate delle comuni velocità stellari, ma crescono, al crescere della distanza delle nebulose, secondo una legge di proporzionalità semplice, cosí semplificabile: una nebulosa che dista 1 megaparsec — cioè 3.26 milioni di anni-luce — avrebbe una velocità di

Fig. 28. — Nebulosa spirale nel Triangolo.
(*Monte Wilson*)

500 chilometri al secondo; una nebulosa distante 2 megaparsec avrebbe una velocità di 1000 chilometri, e via dicendo. Di piú: la velocità è diretta nel senso di un allontanamento da noi, lungo la nostra visuale; della novantina di nebulose studiate a questo proposito, tutte, tranne cinque, paiono fuggirci, volte verso chi sa quale destino; si allontanano come W. de Sitter aveva suggerito fin dal '17, sebbene in una misura alquanto diversa e cioè proporzionalmente alla distanza, non al quadrato della distanza.

Cinque nebulose, dicevamo, anziché allontanarsi si avvicinano a noi. È pur vero che le eccezioni sogliono essere invocate a confermare la legge; ma di esse conviene rendersi conto e non è lecito prescinderne *a priori*. Orbene questi cinque casi sono stati oggetto di attento esame non meno degli altri. Essi concernono velocità e distanze che appartengono all'estremo inferiore della scala del fenomeno. Perché mai si allontanerebbero le nebulose piú lontane e si avvicinerebbero le altre? Chi studia un effetto, un fenomeno, sa di aver sempre da fare con errori di osservazione, di calcolo, con cause perturbatrici la cui influenza può essere magari trascurabile se l'effetto ha proporzioni ragguardevoli ma in caso contrario potrebbe invece alterare, annullare, neutralizzare in tutto o in parte l'effetto medesimo. Perché escludere senz'altro che il manifestarsi di questo effetto di allontanamento delle nebulose potesse venire profondamente turbato, alterato, entro i limiti di distanze e velocità basse cui corrispondono, proprio in conseguenza di ciò, valori esigui dell'effetto? Doveva riuscire utile, nello studio del fenomeno,

considerare il sistema di riferimento scelto per il calcolo delle velocità. Invero, se un viaggiatore cammini a passo svelto da Ovest verso Est su un lentissimo treno che si sposta da Est verso Ovest, si allontanerà, almeno in un certo intervallo di tempo, dalla locomotiva e si avvicinerà alla stazione di partenza: lo stesso movimento, a seconda del sistema di riferimento (stazione o locomotiva) o del suo stato, ha un senso o l'opposto. Ora, il sistema di riferimento scelto per la misura delle velocità delle nebulose, come delle comuni velocità stellari, è il *Sole*; ma il *Sole* non è immobile nello spazio ed invece si muove intorno al centro del sistema della *Via Lattea*, descrivendo la sua orbita alla velocità da 200 a 300 chilometri al minuto secondo. Risultato molto notevole: se le velocità delle cinque nebulose ribelli alla comune legge dell'allontanamento vengono corrette in modo da risultare riferite non piú al *Sole* ma al centro della nostra *Galassia*, esse si abbassano; e non c'è da disperare di poterle vedere trasformarsi in velocità di allontanamento col sussidio di altre piccole correzioni che son ritenute necessarie, mentre anche una sola eccezione potrebbe infirmare la validità della teoria.

Nondimeno, sia pure provvisoriamente, potremo superare l'ostacolo di queste eccezioni: comprendendo entro una sfera del raggio di piú di un milione di anni-luce, descritta intorno alla nostra *Galassia*, le nebulose che esitano fra l'allontanarsi e l'avvicinarsi. Sarà allora legittimo affermare che le nebulose trovantesi nel vasto spazio esterno alla sfera fuggono unanimemente lontano da noi: invero piú di ottanta

nebulose, quante sono quelle studiate che si trovano in detto spazio, hanno un moto diretto in tal senso e non se n'è vista alcuna la quale sia venuta a prendere il posto di una di esse, sicché può ovviamente concludersi che coll'andar del tempo quelle regioni celesti finiranno per spopolarsi. Le fantasiose e gigantesche abitatrici saranno andate piú lontano, sempre piú lontano, e i nostri telescopi non le potranno raggiungere se nel frattempo non avranno aumentato la loro apertura: del doppio, si calcola, ogni 1300 milioni di anni!

L'Eddington non vuole attribuire agli anzi detti fatti astronomici un valore dommatico, non essendo neppure da escludere errori od inesatte interpretazioni; ma egli ritiene che quanti esplorano praticamente le profondità dell'Universo materiale, e mirano a riconoscerne le caratteristiche generali, abbiano in mente l'immagine di un universo che si espande.

## IL MECCANISMO DELL'ESPANSIONE

Tenteremo ora di descrivere sommariamente il meccanismo del fenomeno. Le nebulose spirali, dunque, fuggono lontano da noi. Ma che, essendo 1 la velocità alla distanza 10, diventi 2 alla distanza 20, significa che esse si allontanano da noi, allontanandosi in pari tempo l'una dall'altra, secondo la stessa legge. Allo stesso modo, fissati due punti su un pallone elastico, quando questo si gonfia, anche i due punti si allontanano reciprocamente e proporzionalmente alla distanza che li separa. Per altra evidente

analogia, supponiamo una sala col pavimento a scacchiera e al centro d'ogni quadrato un uomo, in modo che fra due uomini successivi intercorra la distanza di 1 metro. Se la sala a un certo momento si dilata fino a raddoppiare i propri lati, anche la distanza fra due uomini contigui verrà a raddoppiarsi. Designando con A, B, C,... quelli situati sulla stella fila, A disterà quindi 2 metri anziché 1 da B, 4 metri da C e cosí via. Questa è la descrizione sommaria e schematica dell'espansione uniforme e generale dell'Universo delle Galassie, almeno nel campo sin qui esplorato, che si estende fino a 150 milioni di anni-luce. Ed è chiaro come sia piú esatto affermare che non le nebulose spirali si allontanano da noi, ma noi e quelle galassie ci allontaniamo reciprocamente.

Ci sembra opportuno precisare questa reciprocità; anche perché all'uomo comune vien naturale domandarsi se per avventura le fuggenti Galassie non si troverebbero nelle condizioni di una squadra navale che da un promontorio vedessimo allontanarsi nell'oceano, per perderle di vista a un certo punto, senza tuttavia farci passare per la mente l'ipotesi di una dilatazione dell'oceano. Consideriamo di fatto che l'oceano si estende molto di là dal limite che il nostro occhio o i nostri strumenti possono raggiungere; e potremmo considerare che anche lo spazio nel quale si muovono le nebulose non finisca sul confine delle nostre osservazioni, ma lo superi sempre indefinitamente.

Per l'uomo comune e il poeta, lo spazio è infinito; o, meglio, essi non sanno concepirlo finito.

Senza addentrarci in particolari, ed in enunciazioni le quali sarebbero poco accessibili, va detto come l'idea di uno spazio, di un Universo infinito comporti difficoltà teoriche né poche né lievi e perciò EINSTEIN sia stato indotto a postulare che «lo spazio è finito ma illimitato». L'affermazione arieggia al paradosso. Ma consideri il lettore una enorme sfera di raggio $R$: la sua superficie e le altre dimensioni sono certamente finite, giacché le formule che servono a calcolarle contengono coefficienti numerici finiti, la costante che è il rapporto fra la circonferenza e il diametro, e infine il raggio, pure dato. Se un corridore delle infime specie animali sia costretto a marciare ininterrottamente sulla superficie sferica, il singolare maratoneta non riuscirà mai né a riconoscere il cammino percorso, né a sapere quando ripassi per uno stesso punto, né a riconoscere dove abbia avuto inizio o dove avrà termine il cammino stesso: ecco che la superficie è finita, ma anche illimitata, perché manca di punti di riferimento.

Certamente le cose non son tanto semplici in rapporto allo spazio universo; ma quanto s'è detto basterà a far discernere come illimitato e infinito non siano nel linguaggio relativistico dei meri sinonimi.

Spazio chiuso e finito quindi, lo spazio universo, con un raggio intorno ai mille milioni di anni-luce, prima che avesse inizio la dilatazione — come si calcola; e le nebulose spirali non s'allontanano in uno spazio infinito rispetto ad un determinato centro, ma è come se lo spazio finito si dilatasse in rapporto alle nostre ordinarie unità di misura, disperdendo le

Galassie. Cosí è anche da escludere per varie considerazioni che le nebulose le quali si allontanano in un senso possano riapparire ai lontanissimi nostri pronipoti avvicinandosi ad essi in senso opposto, quasi avessero compiuto una specie di viaggio di circumnavigazione celeste.

Perché, in ogni modo, queste isole si disperdono tra oceani di spazio dove la materia è ridotta veramente a *rari nantes in gurgite vasto*? La domanda non è diversa da quella che volesse giungere a conoscere il perché dell'attrazione universale; e i perché trovano spesso sorda la scienza e impotente la filosofia. Ma, certo, se non esistesse codesta attrazione, l'Universo cosí com'è non potrebbe esistere e nel piú caotico disordine immaginabile, isole e arcipelaghi celesti, stelle e pianeti e comete conflagrerebbero in tragiche vicende.

È ormai risaputo che la legge di gravitazione universale è diventata piú perfetta nella enunciazione relativistica: la gravitazione di EINSTEIN, EDDINGTON, WEYL non solo serve agli stessi scopi teorici e agli stessi calcoli della legge newtoniana ma prevede accertati effetti che questa ignorava; e di essa può considerarsi quale una generalizzazione. Orbene, verificatasi la necessità — e secondo il WEYL la indispensabilità — di correggere la sua primitiva equazione gravitazionale, EINSTEIN credette di dovervi aggiungere un termine dove figura una nuova costante: la costante *lamda* o ''costante cosmica'', definendosi tutto il termine quale ''termine cosmico''. Detta costante, nel caso di un campo gravitazionale

non molto intenso, com'è il sistema solare, può essere trascurata; e allora l'equazione gravitazionale esprime null'altro che l'attrazione cosmica. Ma quando ciò non avvenga, cioè quando entrino in giuoco campi gravitazionali piú intensi e distanze noverabili a milioni di anni-luce, il termine cosmico, aggiunto indipendentemente dalla teoria dell'espansione dell'Universo, pel fatto di contenere la costante naturale *lamda* suggerisce l'esistenza di una forza di repulsione cosmica proporzionale alla distanza.

Abbiamo cosí accennato per la prima volta ad una ''teoria'' dell'espansione dell'Universo. Operai infaticabili, Eddington, De Sitter, l'abate belga G. Lemaître ed altri ne vanno disegnando e tracciando la trama per abbracciare, come si richiede per ogni teoria, i piú disparati elementi onde l'uomo aspira a conoscere il meccanismo della natura materiale nell'estremamente grande e nell'estremamente piccolo. Poco abbiamo detto e nulla piú diremo qui di questa teoria, che con entusiastico slancio ci permette di dare cifre al raggio, alla massa totale, al numero dei protoni e degli elettroni, alla densità media dell'Universo e alla costante cosmica, congiungendo reami che ora paiono confinanti ed amichevoli, ora lontanissimi ed avversi.

Ma questo poco valga almeno ad incitare il lettore ad una piú profonda conoscenza dell'argomento, quale può essergli data, ad esempio dal recente volume dell'Eddington: ''L'Universo in espansione''. E non varrà a suscitargli l'intima commozione che

crea ogni architettura sagace? Miriadi di stelle: *Sirio* cordiale; ricami sognanti come nella nebulosa del *Cigno*; immagini oscure come tetri porti, in *Orione*; la fantasiosa girandola della Galassia rotante nell'*Orsa Maggiore*: sullo stesso mistero costruiamo, architettiamo un sapere che non ci può dare certezze, forse, ma compone l'oggetto di serene contemplazioni.

RAFAELE CONTU

# APPENDICI

*APPENDICE A*

# LA COMPAGNA DI SIRIO E LA NUOVA FISICA

Abbiamo voluto, di bel proposito, che la novella della *compagna di Sirio*, raccontata nella seconda conferenza, non venisse complicata da particolari tecnici; ma alcune altre notizie riusciranno forse gradite ai lettori che abbiano curiosità di accrescere quant'è possibile le loro cognizioni su questa notevole stella. Siamo ora anche in grado, per merito recente di R. H. Fowler, di aggiungere qualche episodio alla " novella poliziesca ".

La stella, compresa fra l'ottava e la nona grandezza, non è poi tanto debole, e la difficoltà di scorgerla dipende solo dalla luce abbagliante della sua vicina. In talune epoche favorevoli, tuttavia, è stato facile osservarla con un telescopio di 20 centimetri d'apertura, cogliendola in una fase del suo periodo di rivoluzione che dura 49 anni.

La distanza fra *Sirio* e la sua *compagna* (o *Sirio B*) è press'a poco uguale alla distanza di *Urano* dal *Sole*, vale a dire a 20 volte la distanza *Terra-Sole*; ed avevano formulato l'ipotesi che la luce emessa dalla *compagna di Sirio* non fosse se non quella riflessa da *Sirio* medesima, ciò che poteva spiegarne la bianchezza, ma non le caratteristiche dello spettro, sensibilmente diverse da quelle di *Sirio*. Per poter riflettere un decimillesimo della luce di *Sirio* (che equivale al

suo splendore effettivo), la *compagna* dovrebbe avere all'incirca un diametro di 120 milioni di chilometri, e il suo disco un diametro apparente di 0″.3: tale, perciò, da non poter sfuggire all'osservazione, sia pure in condizioni affatto sfavorevoli. Ma, e l'obbiezione non è di poco conto, l'ipotesi della luce riflessa varrebbe soltanto per questa stella. Infatti, siccome le altre due stelle riconosciute quali nane bianche — di cui diremo in seguito — non hanno vicino nessuna stella brillante, è senz'altro impossibile attribuire il loro splendore a luce riflessa. Però non vale davvero la pena di accogliere una spiegazione la quale, ancorché adatta ad uno di questi strani oggetti, non serve alle altre due stelle.

L'effetto EINSTEIN, che viene invocato per la conferma dell'elevata densità, consiste in un aumento della lunghezza d'onda e quindi in una diminuzione della frequenza della luce: fenomeno di natura gravitazionale, tanto piú notevole quanto piú è intenso il campo che i raggi devono attraversare. Di conseguenza, le righe oscure dello spettro, che compaiono a lunghezze d'onda maggiori, devono spostarsi verso il rosso, rispetto alla posizione che avrebbero le corrispondenti righe terrestri. Al medesimo effetto conducono, sia la teoria gravitazionale della relatività, sia la teoria dei quanti; ed il ragionamento che segue potrà essere capito facilmente da coloro che conoscano un poco la seconda. Basterà, in ogni modo, seguire con attenzione i passaggi analitici indicati, considerando che $h$ è una costante, $\nu$ è la frequenza della radiazione, $c^2$ il quadrato della velocità della luce. L'atomo stellare emette, come l'atomo terrestre, il quanto d'energia $h\nu$, di cui una parte viene impiegata per liberare il quanto dall'attrazione della stella, cioè una quantità uguale alla massa $h\nu/c^2$ moltiplicata per $\varphi$, che è il potenziale di gravitazione alla superficie della stella. L'energia che per ciò rimane, allorché il quanto abbia subíto questa

riduzione, sarà uguale a $h\nu(1-\varphi/c^2)$; e siccome deve ancora costituire un quanto $h\nu'$, la frequenza dovrà assumere il valore $\nu'=\nu\,(1-\varphi/c^2)$. Quindi lo spostamento $\nu'-\nu$ è proporzionale a $\varphi$; cioè, in ultima analisi, alla massa divisa pel raggio della stella.

Quest'effetto sullo spettro rassomiglia all'effetto DOPPLER per la velocità di allontanamento, e non si riesce a separarnelo ove non si conosca già la velocità della stella lungo la nostra visuale. Nel caso d'una doppia, è possibile valutare questa velocità, purché si osservi l'altra componente del sistema; cosí lo spostamento parziale da attribuire all'effetto DOPPLER risulta anch'esso noto. Ora, siccome per effetto del moto orbitale v'è una differenza di velocità tra *Sirio* e *Sirio B*, attualmente pari a chm.4.3 al secondo, bisogna tener conto anche di questo fattore. La differenza osservata fra la posizione delle righe spettrali di *Sirio* e quella delle righe della *compagna* corrisponde ad una velocità di 23 chm. al secondo; dei quali, 4 spettano al moto orbitale e i restanti 19 devono essere interpretati come effetto EINSTEIN. Questi risultati sono stati essenzialmente dedotti da misure relative alla sola riga spettrale $H\beta$.

Le altre righe che potrebbero misurarsi efficacemente cadono nella regione piú rifrangibile dello spettro; e poiché la diffusione atmosferica cresce colla rifrangibilità, si spiega l'interferenza della luce diffusa di *Sirio*. Tuttavia queste righe contribuiscono pure a confermare i risultati esposti.

Delle tre nane bianche, la $o_2$ *Eridani* è una stella doppia, di cui la compagna è una stella nana rossa, meno splendente. Lo spostamento spettrale verso il rosso sarà inferiore a quello di *Sirio B* e quindi difficilmente distinguibile dalle altre eventuali cause d'errore; ma non bisogna disperare di vincere la difficoltà. L'altra stella nana bianca conosciuta è una stella anonima, scoperta

da VAN MAANEN; ed essendo isolata manca il mezzo di separare l'effetto EINSTEIN dall'effetto DOPPLER. Diverse altre stelle, come le doppie *Procione*, *85 Pegasi* e *Mira Ceti*, hanno compagne che si suppone vengano a trovarsi nelle condizioni accennate.

Se la *Sirio B* fosse un gas perfetto, la temperatura al centro dell'astro sarebbe all'incirca di mille milioni di gradi, e la densità nella parte centrale della stella un milione di volte maggiore di quella dell'acqua. Invero, è poco probabile che in queste circostanze le condizioni di un gas perfetto continuino ad esistere; ma, in ogni caso, la densità diminuisce gradualmente dal centro alla periferia della stella, sicché le regioni da noi osservabili sono affatto normali, mentre la materia densa, costretta sotto l'azione dell'elevata pressione, va ricercata nell'interno della stella.

Quel che piú stupisce è la straordinaria differenza di sviluppo che si rivela fra *Sirio* e *Sirio B*, le quali devono pure essere nate contemporaneamente. Considerando la radiazione di massa, l'età di *Sirio* dovrebbe essere inferiore a un bilione di anni; una massa iniziale, comunque grande, irradierebbe in un bilione d'anni tanta materia da ridursi ad una massa certo inferiore all'attuale massa di *Sirio*. Però un periodo di questa durata è trascurabile nell'evoluzione d'una piccola stella la quale irradia piú lentamente, non esapremmo spiegarci che *Sirio B*, abbandonata la serie principale, fosse già pervenuta a quello che è probabilmente lo stadio finale. L'enimma dev'essere aggiunto alle altre difficoltà del problema dell'evoluzione stellare, in rapporto a cui, certo, a noi è ancora ignota qualcosa di fondamentale importanza.

Fino a non molto tempo fa, noi pensavamo che vi fosse una seria o, se piace meglio, una comica difficoltà a riguardo del destino finale delle stelle nane bianche. La

loro elevata densità è solo resa possibile in virtú della demolizione atomica, dipendente a sua volta dall'alta temperatura; e non sembra lecito supporre che la materia si mantenga in questo stato di compressione ove la temperatura si abbassi. Possiamo prevedere il momento in cui venga a mancare la provvista di energia subatomica e, non restando piú niente che possa mantenere un elevato grado di temperatura, la materia torni, raffreddandosi, alla normale densità dei corpi solidi terrestri. La stella dovrà in seguito espandersi, e perché possa raggiungere una densità mille volte inferiore, il suo raggio dovrà, a sua volta, decuplicarsi. Occorrendo allora fornire alla materia l'energia necessaria per vincere la forza di gravitazione agente su di essa, dove bisognerà cercarla? Una stella ordinaria non si troverà in possesso d'una quantità di energia calorifica interna che le consenta di dilatarsi vincendo la forza gravitazionale; e non sapremmo immaginare che le nane bianche siano cosí previdenti da costituirsi una speciale riserva di energia cui attingere per sí remota contingenza. In questa guisa, la stella può trovarsi nella difficile situazione di dover perdere constantemente calore, senza possedere l'energia sufficiente per raffreddarsi.

Un modo per trarci d'impaccio dal dilemma, sarebbe quello artifizioso dei romanzieri che, avendo condotto i loro personaggi a situazioni oltremodo imbarazzanti, non hanno altra via d'uscita se non quella di ucciderli tutti. Cosí, potremmo supporre che l'energia subatomica cessi di liberarsi solo quando la massa sia completamente esaurita per radiazione o, almeno, non prima che la stella abbia superato il suo stadio di nana bianca. Ma questo è solo un modo per evitare parte delle difficoltà: la teoria deve pur preservare automaticamente dalle difficili situazioni, e non invocare proprietà singolari della materia per proteggere le stelle reali dal paradosso.

Sembra tuttavia che R. H. FOWLER, coi risultati recenti delle sue indagini, riesca ad eliminare ogni difficoltà. Egli conclude inattesamente che la materia densa della *compagna di Sirio* possiede ricche riserve d'energia con cui provvede alla propria espansione. Il punto interessante di questa soluzione consiste nel fatto che essa ricorre a taluni dei piú recenti sviluppi della teoria dei quanti: la " nuova statistica " di EINSTEIN e di BOSE e la " teoria ondulatoria " di SCHROEDINGER; e davvero stupisce, che mentre questa materia di enorme densità teneva desta l'attenzione degli astronomi, i fisici andassero sviluppando a loro volta una nuova teoria della materia, concernente in modo speciale le densità elevate. Secondo questa teoria, la materia è dotata di certe proprietà ondulatorie che alle densità terrestri sono quasi trascurabili, ed hanno invece molto peso quando si tratti di densità come quella della *compagna di Sirio*. Esaminando appunto queste proprietà, il FOWLER riesce a rintracciare la sorgente d'energia che risolve la nostra difficoltà e non era neppure supponibile alla luce della teoria classica della materia. Le nane bianche appaiono però come un eccellente campo di studio per gli sviluppi piú rivoluzionari della fisica teorica.

Per avere una sommaria idea della nuova teoria della materia densa, consideriamo di nuovo la fotografia della serie di BALMER (Fig. 16). Essa ci mostra la luce irradiata da un gran numero di atomi d'idrogeno in tutti gli stati possibili, fino a quello contrassegnato col n. 30, nelle proporzioni medesime in cui questi ricorrono naturalmente nella cromosfera solare. La vecchia teoria elettromagnetica faceva prevedere che gli elettroni muoventisi lungo traiettorie curve dovessero continuamente irradiare luce; e la teoria statistica di vecchio stile faceva prevedere un numero relativamente grande di orbite di differenti dimensioni, consentendo il calcolo della distribuzione dell'inten-

sità luminosa lungo tutto lo spettro continuo. Orbene, queste previsioni non si avverano né indicano la distribuzione della luce quale appare dalla fotografia: ma si manifestano meno erronee, man mano che ci avviciniamo alla testa della serie, giacché le ultime righe della serie si addensano, e però si avvicinano in tal modo da equivalere praticamente ad uno spettro continuo. Di conseguenza, la classica previsione d'uno spettro continuo diviene approssimativamente vera ed in pari tempo anche le previsioni classiche che concernono la sua intensità. Vi è un celebre " principio di corrispondenza " enunciato da Bohr, il quale asserisce che per gli stati di ordine elevatissimo le nuove leggi quantiche si confondono colle vecchie leggi classiche. Se non ci avvenisse mai di dover considerare stati di numero basso, sarebbe per ciò indifferente che calcolassimo l'irradiazione, o interpretassimo le statistiche, secondo le antiche leggi o secondo le nuove.

Negli stati d'ordine elevato, l'elettrone si trova per lungo tempo molto lontano dal nucleo; ed infatti se l'elettrone ed il nucleo sono costantemente vicini, vuol dire che l'atomo è in uno stato di numero basso. Perché, quindi, non dovremmo aspettarci che, nella materia estremamente densa, la continua prossimità delle particelle provochi fenomeni caratteristici degli stati di numero basso? Non vi è reale discontinuità fra l'organizzazione degli atomi e l'organizzazione delle stelle; i legami che uniscono le particelle nell'interno dell'atomo uniscono anche gruppi di particelle piú numerose ed estese come, eventualmente, l'intera stella. Finché questi legami appartengono a numeri quantici elevati, l'antica concezione che rappresenta le reciproche azioni quali forze intese nel senso classico, ed ignora gli "stati", è abbastanza vicino alla verità. Per le altissime densità questa concezione, invece, non resiste, e non è piú consentito parlare di forze,

di velocità e di distribuzione di particelle indipendenti, bensí di stati.

Come la concezione classica venga a decadere, può essere meglio capito, ove si passi subito allo stato limite, in cui la stella diventa un sistema semplice o molecola allo stato n. 1. Al pari di un atomo eccitato — che si indebolisce a poco a poco in conseguenza di salti discontinui, analoghi a quelli che dànno la serie di BALMER —, la stella, dopo gli ultimi palpiti di irradiazione, raggiungerà lo stato estremo, di là dal quale non esistono piú stati. Ciò non significa già che un'ulteriore contrazione sia impedita dallo schiacciarsi, l'una contro l'altra, delle ultime particelle elementari; né che l'atomo d'idrogeno non possa piú contrarsi perché l'elettrone sia arrivato ad aderire al protone; ma certo ogni progresso si arresta, perché la stella è tornata al primo stadio della serie completa dei possibili stati di un sistema materiale. Un atomo di idrogeno allo stato n. 1 non può irradiare; tuttavia l'unico suo elettrone si muove con intensa energia cinetica. Parimente, una stella che raggiunge lo stato n. 1 non irradia piú, nondimeno le sue particelle continuano a muoversi con un'energia cinetica estremamente grande. Qual è la sua temperatura? Se la si misura in funzione del potere di irradiazione, la sua temperatura assoluta è zero, giacché la radiazione è nulla; se la si misura in funzione della velocità media delle molecole è invece la massima che la materia possa raggiungere. Il destino finale di una nana bianca è quello di divenire ad un tempo la piú calda e la piú fredda materia dell'Universo. Per ciò la nostra difficoltà è risolta duplicemente. Poiché la stella è intensamente calda, ha energia sufficiente a raffreddarsi, ove lo desideri; poiché è intensamente fredda, non irradia piú, e non può avere alcun desiderio di raffreddarsi ulteriormente.

Abbiamo cosí descritto quel che riteniamo possa essere

lo stato finale delle nane bianche e forse di tutte le altre stelle. *Sirio B* non ha ancora raggiunto questo stato, ma è cosí avanzata sul cammino che ve la può condurre, da doversi escludere ogni ricorso alle classiche concezioni. Se delle stelle hanno raggiunto lo stato n. 1, esse sono invisibili e, come gli atomi nello stato normale piú basso, non emettono piú luce.

I legami che governano l'atomo e sovvertono il concetto classico di forza si sono estesi a tutta la stella. E non credevamo davvero che, volendo trattare insieme e delle stelle e degli atomi, potessimo concludere con la fugace visione di una stella-atomo.

*APPENDICE B*

# L'IDENTIFICAZIONE DEL NEBULIO

Era appena apparsa la prima edizione di questo libro, che, nell'autunno del 1927, l'astrofisica doveva registrare un avvenimento importantissimo: l'identificazione del nebulio da parte del dr. I. S. Bowen.

A pagina 66 scrivevamo: « Il nebulio non è un nuovo elemento. Dev'essere un elemento molto comune, anche se non possiamo identificarlo, perché ha perduto parecchi elettroni »: infatti s'è trovato che non è se non ossigeno, con due elettroni di meno. Ma alla sua identificazione si collegano circostanze impreviste giacché, mentre nei nostri laboratori è possibile sottrarre, senza molte difficoltà, due elettroni all'atomo di ossigeno, cosí da ottenere un atomo di nebulio, l'atomo mutilato non emette tuttavia nei laboratori la luce caratteristica del nebulio. Orbene, l'insuccesso dei tentativi intesi a produrre artificialmente questa luce non andava attribuito a difetti delle nostre esperienze di bombardamento atomico; ma al fatto che eravamo incapaci di dare agli atomi la tranquillità necessaria per potere emettere le righe spettrali caratteristiche del cosí detto nebulio.

Nella seconda conferenza (Pag. 67) accennavamo anche

alla gara cui s'erano dati i fisici sperimentali ed i fisici teorici desiderosi di svelare il mistero del nebulio; ebbene, la ragione del successo va appunto ricercata nella loro cordiale collaborazione. Per capire bene di che si tratta, dobbiamo anzi tutto notare che, quando si sia riusciti a misurare sperimentalmente la posizione di qualche riga d'uno spettro, la posizione di alcune altre può venire calcolata mediante una regola semplice e precisa. Considerando, ad esempio, tre stati di un atomo, secondo questa regola la frequenza della riga spettrale emessa per effetto del passaggio dallo stato 3 allo stato 1 è la somma delle frequenze delle righe emesse al passaggio dallo stato 3 allo stato 2 e dallo stato 2 allo stato 1. Similmente, se vi fossero 10 stati basterebbe misurare la frequenza di 9 righe spettrali; applicando ripetutamente detta legge riusciremmo calcolare l'intero spettro, costituito di 45 righe corrispondenti alle possibili 45 coppie di stati, fra cui può avvenire il passaggio da cui deriva l'emissione delle righe. La fisica teorica ambisce di poter calcolare uno spettro, quando sia nota soltanto la costituzione elettronica dell'atomo, senza alcun soccorso dell'osservazione; ma fino ad oggi non vi si riesce se non per edifizi atomici molto semplici. Tuttavia, con mire meno ambiziose, partendo da uno spettro che sia stato solo parzialmente osservato, è possibile calcolare il resto. La luce che ci proviene dall'ossigeno ionizzato esistente nelle lontane nebulose non trova riscontro in alcuna regione dello spettro prodotto dallo stesso elemento nelle esperienze terrestri; è tuttavia certo che la si debba attribuire all'ossigeno, poiché il suo spettro è quale risulta lo spettro dell'ossigeno, ove lo si completi teoricamente al modo indicato.

Riusciamo quasi sempre a fare accostare un cavallo all'abbeveratoio; ma ci sarà dato in tutti i casi ottenere che egli beva? Davvero no. Cosí nei nostri laboratori potremo ionizzare due volte l'atomo d'ossigeno e ridurlo ad

uno stato 2, ma non possiamo forzarlo a tornare allo stato 1. Guidati dalla teoria, giungiamo a sapere precisamente quale specie di luce sarebbe emessa in conseguenza di questo passaggio; e riconosciamo infatti che nelle nebulose vi sono atomi i quali emettono spontaneamente la medesima luce, mentre non la emetterebbero ad un nostro ordine: nessuno di noi riuscirà a farli saltare in un qualsiasi modo dallo stato 2 allo stato 1, ché essi vorranno passare per gli stati 3 e 4. Cosí un certo numero di righe dello spettro, completato secondo l'anzi detta regola, non appare mai nelle nostre esperienze, giacché l'atomo si rifiuta di fare il salto corrispondente; vi è infatti un'altra regola di selezione la quale ci permette di prevedere quali righe dovranno mancare o sono, come si dice, " righe proibite ". Sembra, tuttavia, che il divieto abbia luogo solo nelle esperienze terrestri, e non per tutti i fenomeni nell'Universo.

Possiamo raffigurarci l'elettrone di un atomo eccitato come un viaggiatore, che si trovi all'ultimo piano d'uno di quegli alberghi dei tempi andati, con il consueto intrico di scale fra cui è necessario scegliere quella che lo possa condurre, poniamo, alla sala di lettura, corrispondente allo stato normale dell'atomo non eccitato. Numerose sono le vie per le quali il viaggiatore può discendere; ma potrà darsi che manchi proprio quella che gli permetterebbe di discendere direttamente da un corridoio all'altro; e che giunga ad un pianerottolo chiuso da cui non parta alcuna scala per consentirgli di discendere ai piani inferiori: dovrà allora risalire al piano superiore per cercarvi la scala adatta. Il pianerottolo chiuso corrisponde ad uno stato dell'atomo, il quale, pur non essendo l'estremo inferiore, è tale che da esso gli sono preclusi tutti i passaggi verso i piani inferiori. È lo stato che si chiama " metastabile ". I passaggi per i quali l'elettrone può salire sono numerosissimi, ma non potrà usu-

fruire di alcuno di essi, ove non si provveda una certa quantità d'energia supplementare, attingendola a sorgenti esterne. Senza quest'acquisto d'energia, l'elettrone potrebbe, da sé, soltanto discendere; e, pervenendo ad uno stato metastabile, non avrebbe modo di discendere ulteriormente.

I mezzi coi quali l'elettrone può uscire dal pianerottolo chiuso sono tre. Il primo è dato dall'acquisto d'energia mediante assorbimento di luce, nella quantità necessaria per raggiungere il livello piú elevato, da cui tenterà una nuova via di discesa, arridendogli questa volta la fortuna di riuscire ad arrivare in fondo. Il secondo mezzo si avrà quando, producendosi un urto con un altro atomo od un elettrone libero, le regole usuali non valgono piú. Allora accade come dell'ospite che venisse a trovarsi nella sala di lettura condottovi da una intelligente scossa sismica. In questo caso, tuttavia, la luce corrispondente al passaggio non viene emessa, giacché l'atomo s'è liberato altrimenti della propria energia. Finalmente, se sarà stata vana la lunga attesa di poter uscire dal pianerottolo chiuso in uno dei due precedenti modi, l'elettrone si avventurerà per uno dei passaggi vietati, e verrà allora emessa la riga proibita dello spettro. L'indicazione "Uscita di sicurezza" perciò appare piú adatta dell'altra "È vietato il passaggio".

Nelle esperienze terrestri, l'atomo non può essere lasciato tranquillo per piú d'un millesimo di secondo e in questo lasso di tempo urterà contro altri atomi gassosi, o magari contro le pareti del tubo di gas rarefatto. Tutti gli atomi che si trovano in uno stato metastabile hanno ogni possibilità di disimpegnarsene in un tempo inferiore al millesimo di secondo, e non hanno bisogno di ricorrere all'uscita di sicurezza. Nella materia rarefatta che circonda il *Sole* — cromosfera e corona — gli urti sono rari; tuttavia l'intensa radiazione solare eccita gli atomi

parecchie migliaia di volte al secondo, sicché possono presto abbandonare la loro metastabilità, mediante passaggi a livelli piú elevati. Ma, nella solitudine di una nebulosa, l'atomo può vagare per un anno, ed anche piú, senza urtare niente; e la luce attraversante la nebulosa è tanto debole che l'eccitazione ha luogo solo all'incirca una volta al secolo. Un atomo che dopo l'ultimo eccitamento sia caduto in uno stato metastabile esita per molto tempo, e finirà per avviarsi verso il passaggio vietato ove nulla intervenga a disimpegnarlo. Cosí, nella calma della nebulosa, osserviamo una luce che non viene emessa nel trambusto di un " tubo a vuoto ".

Va notato che l'enorme estensione delle nebulose ha molta parte nell'apparizione di queste righe proibite. Non sappiamo quanto tempo debba attendere l'atomo nel suo stato metastabile: se un minuto, un mese, o magari un secolo. Non c'è modo di fare affrettare l'atomo, e se non gli consentiamo il necessario riposo, non emette la riga proibita. L'irradiazione del nebulio dev'essere quindi estremamente debole, a paragone, poniamo, della luce emessa dal calcio della cromosfera solare, in cui ciascun atomo fa il suo cammino ventimila volte al secondo (Pag. 90). Il gran numero degli atomi esistenti in una nebulosa compensa la loro pigrizia individuale. Se una nebulosa contiene una quantità di ossigeno uguale alla massa solare — risultato accettabile per nebulose diffuse — e se ogni atomo d'ossigeno è eccitato in modo da poter emettere la luce del nebulio una volta al secolo, l'intensità totale della luce del nebulio sarà cento volte maggiore dello splendore solare.

L'identificazione del nebulio trae conferma dal fatto che le altre righe notevoli ed ignote degli spettri delle nebulose sono stati identificati con righe proibite. Alcune appartengono ad ossigeno ionizzato una volta, le altre ad azoto parimente ionizzato una volta. Ma il nome d'un

miscuglio d'azoto e d'ossigeno ci è ben familiare. Ancora una volta la natura ha voluto prendersi giuoco di noi. Essa aveva adornato i cieli di nebulose che brillano di una luce mai vista — *light that never was on sea or land* — e noi immaginiamo elementi strani che avrebbero dovuto comporla, giungendo persino a battezzarli con nuovi nomi. Ma il fluido luminoso che ci ha cosí a lungo burlato non è se non " aria ".

# INDICE ANALITICO

*I numeri romani in tondo indicano le singole conferenze; quelli in corsivo, le pagine introduttive; i numeri fra parentesi, le figure; gli altri, le pagine del testo e dell'Appendice. Sarà opportuno che il lettore dia preventivamente una scorsa a tutto l'indice, affinché, riconosciutone il criterio ordinatore, lo possa consultare, quindi, più agevolmente.*

## A


ABETTI, *XIII-XXV*, *XXVII*, *XXVIII*.
ADAMS, *XXI*, 58, 61-2.
*Algol*, 47-56, 63, 103, 109, 142-4, 147-8.
ALLISON, 66.
ammasso-i stellare-i, 117-8; — ω *Centauri* [23], 116.
analogie: astronomo-architetto, 4, 18; atomi stellari, 19, 68, 169; atomo-corpo umano-stella, 2, 107-8; corrente d. luce, 26; densità d. *Sirio*, 59; densità nube cosmica, 174-5; distribuzione materia solare, 7; elasticità d. gas, 5; elettrone d. atomo eccitato, 203; esistenza nube cosmica, 160-1; espansione d. universo, 190, 195-6; galleggiamento atomi solari, 87...; impronta digitale, 13, 14; interno d. stelle, 17, 26; materia cosmica, 187; metereologia solare, 3-4; misura d. velocità, 194; nebulio, 66; onde luminose, 84-5; opacità stellare, 31; periodo stelle variabili, 111; polvere atomica, 162; pressione d. luce, 25; quanto, 177-8; sistema solare-atomo, 2, 11-2; sistema stellare, 1; spazio finito, 197; spettroscopia, 68; splendore stellare, 115; stati atomici, 214; stelle invariabili, 113; temperatura, 9; temperatura nube cosmica, 175-6; traiettorie atomiche, 14; urti molecolari, 6.
ANDERSON, 102.
ANGSTROEM, 169.
annichilazione d. materia, 127-132.
*Antares*, 96.
approssimazione, grado d., 111.
aria, 163, 186, 218.
*Arturo*, 115, 175.
assorbimento onde eteree, 31..., 88-94.
ASTON, 130.

astrofisica, *XVII*, *XVIII*, 64.
astronomia, *XIII-XXV*.
atomo-i: *passim*: — eccitati, 72, 90-3, 210...; — interstellari: v. *materia cosmica*; — stellari, *passim*.
atmosfera elettronica, 12, *passim*.
attrazione cosmica, 199.

## B

Bacone, 190.
Balmer, 72, 74-5, 77, 208, 210.
*Betelgeuse*, 60, 78, 95-105, 138.
Bessel, 56.
Bohr, 72, 76, 209.
*Bootis*, Alfa d., 115.
Boltzmann, 20.
Bose, 208.
Bowen, 213.

## C

Calcio, 68-9, 81-4, 88-95, 164-169, 180-2.
calore, 133; — d. gas, 5, 9.
*Capella*, 29, 33, 36-40.
*Capra*, 29.
*Cefeo*, Delta d., 108-16, 121, 146, 154.
*Cefeidi*, *XXI*, 35, 103, 112-9, 121-2, 155-6, 191-2.
*Centauro*, Alfa d., 37.
citazioni, 17, 146, 173, 185.
Clark, 57.
*Cocchiere*, 29.
condensazione d. nebulose, 138, 172.
confronti: v. *analogie*.
considerazioni s. scienza, *XIII-XXV*, 16-7, 27, 44-6, 63, 70, 95, 104-5, 117, 133-4, 145, 157-8, 168, 170, 200.
Contu, *XIII*, *XXII*, *XXIII*, *XXVII-XVIII*, 189-200.
costante *lamda*, 198-9.
Cottingham, 87.
crinolina elettronica, 12, 43.
cromosfera solare [1, 20, 21], 87-95, 148.
curvatura d. spazio, 104, 170.

## D

Davidson, 74.
De Broglie, *XXIV*.
densità, critica, 170; — d. aria, 29; — d. *Sole*, 40.
De Sitter, *XXIII*, 193-199.
disgregazione atomica, 21-2.
Doppler, 52, 94, 205-6.
Draper, 51.

## E

Eddington, *IX-XII*, *XIX-XXIV*, *XXVII*, 20, 87, 189, 195, 198-9.
effetto, Doppler, 52, 80, 94, 163, 193-4; — Einstein, 61-63, 104, 191, 204-6.
Einstein, *XXI*, *XXIII*, 61-2, 104, 170, 197-8, 204-208.
elasticità d. gas, 5-6.
elementi, extraterrestri, 64-72, *passim*; — nuovi, 64-72.
elettroni, 2, 11, 177-8, *passim*.
elio, 65-6, 76, 129-31; — idrogenoide, 76.
energia subatomica, 127-37, 150-7, 207.
erg, 125.
espansione d. Universo, *XXII-XXV*, *XXVII*; V: 189-200.
età d., stelle: v. *stelle*; — *Terra*, 120, 123.
evoluzione d. elementi, 71, 136.

## F

Figure d. diffrazione, 101.
flash-spectrum [17, 18], 74.
fotografia d., atomi [9], 13...; —elettroni [10], 13...;—raggi X [11], 15; — *Sole* [1-8]; — stelle, 3.
forze d. marea, 53.
FOWLER A., 65, 69, 76-7.
FOWLER R. H., 44, 191, 208.

## G

*Galassie*, 190...
GALILEO, *XIV*, *XXV*, 163.
gas, elettronico, 178-9; — perfetto, 33..., 62-3, 140, 151, 206; — ultraperfetto, 43-4.
*Gemelli*, 191.
*Giove*, 38, 68, 77, 111.
grado d. annerimento, 166.

## H

HEAVISIDE, 169.
HELMHOLTZ, 119, 121-2.
HERSCHEL, *XXII*, 185.
HERTZSPRUNG, *XXIII*, 139.
HOEPLI, *XIII*.
HUBBLE, *XXI*, *XXIII*, 119.
HUMASON, *XXIII*.

## I - J

Idrogeno, *X*, 19, 22, 72..., 129-31.
immagini telescopiche, 97-102.
interferometriche, misure, 97-103.
isotopi, 123.
*Iadi*, 37.
ioni, 12.
ionizzazione [11-2], 12-22, 69, 90..., 177.

## K

KEATS, 186.
KELVIN, 119-22, 124, 133.
KOHLHOERSTER, 11, 134.
*Krueger 60*, 37, 40-1, 138, 142-5, 147, 154.

## L

LANE, 140.
LEAVITT, *XXI*.
LEMAÎTRE, *XIII*, *XXIV*, 199.
LEVI-CIVITA, *XXIII*.
LOCKYER, 66, 137.
*Lucertola*, 37.

## M

MAANEN, van, 194.
macchie solari [4,8], 3, 11, 163.
MCLAUGHLIN, 53-4.
massa, critica, 24-5; — d. energia, 125-6; — elettronica, 11, 77; — solare, 23.
materia cosmica, *XXII*, 78-86; IV: 159-87; —: densità, 79, 170-4; — prove e testimonianze, 162-9, 180-3; — temperatura, 86, 174-80.
MAXWELL, 20.
megaparsec, 192.
MICHELSON, *XXI*, 60, 102.
MILLIKAN, 11, 134.
MILNE, 69, 91-2, 94-5.
*Mira Ceti*, 206.
MORSE, 48.

## N

Nebulio, 66-7, 213-18.
nebulosa-e, 117-8; — d. *Andromeda*, *XXI*, 119, 121, 190; — d. *Cigno* [24], 160; n.

*Gemelli*, 191; — d. *Lira* [14-5], 64, 76; — d. *Orione* [25], 79, 200; n. *Orsa Maggiore*, 200; d. *Triangolo* [28], 190; —: allontanamento, *XXIII*, 191...; —: avvicinamento, 193...; —: densità, 79; —: distanze, 192...
nebulosità d. spazio: v. *materia cosmica*.
numero, atomico, 65-6; — d. atomi, 2, 15-6; — d. stelle, 192.

## O

*Orione* [27], 79, 96, 200; — Delta d., 163.
orbite elettroniche, 73, 91-2, 207.
ossigeno, 214.

## P

Parallasse, 51.
PEASE, 102.
*Pegasi 85*, 194.
PERSEO, 167; — Beta d., 108: v. *Algol*.
PICKERING, 75-7.
pigrizia d. luce, 84.
PLASKETT, 82-3, 165.
PLUMMER, 108.
*Plutone*, 159.
pressione d. radiazione, 23-6, 149.
principio d. corrispondenza, 209.
*Procione*, 206.
protuberanze solari [20, 21].

## Q

Quanto d. luce, 86, 177-9.

## R

Radiazione d. massa, 146-58.
raggi *alfa*, 191; cosmici, 10-1, 134-5; — *gamma*, 10; — Roentgen, 10...
rapporti: v. *analogie*.
repulsione cosmica, 199.
righe spettrali, caratteristiche, 67; — fisse, 80-6, 89, 163-9; — proibite, 215.
ROENTGEN, 18.
ROSSITER, 53.
RUSSELL, 139, 153.

## S

SAHA, 69.
SCHROEDINGER, 208.
*Scorpione*, Alfa d., 96.
scossa atomica, 77.
SECCHI, *XI*, *XVI*, *XVIII*, *XXII*, 51.
serie d., Balmer [16], 72-7, 208-9; — Pickering, 75-7.
serie principale d. stelle, 142-4, 150.
SHAKESPEARE, 173.
SHAPLEY, 108, 117.
*Sirio*, *XX*, *XXI*, 37, 56-63, 70-1, 96, 103-4, 200, 203-11.
SLIPHER, *XXIII*, 191.
Sodio, 180-3; v. anche *calcio*.
*Sole* [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 20, 21] I: 1-46, 142, *passim*; —: densità, 63; — temperatura, 4..., 71; v. anche *stella*.
spazio, 196-8.
stati atomici, 72-3, 209-10, 214-5; — metastabili, 215-7.
spettro-i, stellari, 64-78; — d. *Sole* [19].
spettro-eliografia, 3, 88; — -scopia, 18-9, 68, 70.
STEFANIK, *XV*.

stella-e, *passim*; —: accrescimento esterno, 183-7; —: colore, 58, 137-8; —: composizione chimica, *X*, 18-22, 38-9, 64-72; —: contrazione, 119-26; — dense, 39-44; —: densità, 7, 42-3, v. *Sirio*; — diffuse, 40...139; —: dimensioni, v. *Algol*, *Betelgeuse*, *Sirio*; —: distanze, 116-8; —: energia, 28-36, 119, 158, 207...; —: equilibrio d. materia, 5; —: età; III: 107-158; —: evoluzione, 137-58, 185, 206; — giganti, 41, 139..., 151; —: grandezza, 34-96-7; —: immagine d. interno, 26-8; —: interno d., I: 1-46; —: massa, 24-5, 33-9, v. *dimensioni*; — nane, v. *giganti*; — nane bianche, 61, 140-1, 205-8; — novae, 156; — numero d., 1; —: opacità, 29-32; —: periodi d. variabili, 53, 110-4; —: perdita d. massa, 144... 183; —: pressione, 69-70; — pulsanti, 108-114, 154-7; —: splendore apparente, 116, v. *grandezza*; —: splendore e massa [13], 33-39; —: superficie totale, 135; —: temperatura, 4..., 22, 69, 139..., 153; — variabili, 48...; —: velocità, 10.
stella-atomo, 211.
STOERMER, *XIII*.
strato d., Heaviside, 169; — ozono, 169.
STRUVE, 166.

## T

TACCHINI, *XVI*.
telescopi [22-26].
temperatura-e, 86, *passim*; — cosmiche, 105.
teoria ondulatoria, *XXIV*, 208.
*Terra: passim*.
*Testa d. cavallo* [25], 160.
traiettorie d. corpuscoli [9-10].
trappole d. onde, 31-2.
trasmutazione d. elementi, 127...

## U

Unità Angstroem, 169.
universi insulari, 2, 118, 191.
*Urano*, 59, 203.
USSHER, 120.

## V

Velocità atomiche, 10, 26; — celesti, 10, 191; — elettroniche, 16, 26; d. nebulose, 191...
WEYL, 198.
*Via Lattea*, 135, 190...
vibrazioni eteree, 10..., 27; —: cattura, 31-2; —: trasformazione, 28.

## W

WILSON, 14.

## Z

Zero assoluto, 174.

FINITO DI STAMPARE A MILANO
NELLA SCUOLA TIPOGRAFICA
PIO ISTITUTO PEI FIGLI DELLA PROVVIDENZA
IL IV GIUGNO DELL'ANNO XII

Lire
12,50

EDDINGTON

LUCI

DALL

NEBU

HOEPLI
EDITORE
MILANO